



TREBALL DE FI DE GRAU

GRAU EN ENGINYERIA ELECTRÒNICA DE TELECOMUNICACIÓ

# MODELITZACIÓ I DISSENY D'UN RECOL·LECTOR D'ENERGIA MECÀNICA PER L'ALIMENTACIÓ D'UN NODE SENSOR SENSE FILS

Munteanu, Sergiu Marian

DIRECTOR: Dr. Abadal Berini, Gabriel

DEPARTAMENT DE TELECOMUNICACIONS I D'ENGINYERIA ELECTRÒNICA

UNIVERSITAT AUTÒNOMA DE BARCELONA

Bellaterra, Juliol 06, 2020





El sotasignat, Dr. Gabriel Abadal Berini, Professor Titular d'Universitat del Departament d'Enginyeria Electrònica de la Universitat Autònoma de Barcelona.

## CERTIFICA QUE

Aquest treball titulat “Modelització i disseny d'un recol·lector d'energia mecànica per l'alimentació d'un node sensor sense fils” ha estat realitzat sota la seva direcció per Sergiu Marian Munteanu.

Bellaterra, Juliol 06, 2020

A handwritten signature in blue ink, which appears to read 'Gabriel', is written over a light blue grid background.

Dr. Gabriel Abadal Berini



# Abstract

La recoll·lecció d'energia mecànica vibracional està rebent un interès considerable com a font d'energia per l'alimentació de nodes sensors sense fils. Aquest treball presenta el disseny i modelització d'un recol·lector d'energia mecànica des de la definició de la font de vibracions, fins el disseny i simulació del recol·lector fent servir components piezoelèctrics com a transductors d'energia, però també utilitzats com a cantilevers que, amb l'ajuda d'una massa a l'extrem, s'aconsegueix treballar a la freqüència d'interès. En aquest treball veurem quanta potència mecànica genera el sistema vibracional amb les característiques dissenyades, quanta potència elèctrica s'aconsegueix extreure, i si aquesta és suficient per alimentar un node sensor sense fils.

La recolección de energía mecánica vibracional está recibiendo un interés considerable como fuente de energía para la alimentación de nodos sensores inalámbricos. Este trabajo presenta el diseño y modelización de un recolector de energía mecánica desde la definición de la fuente de vibraciones, hasta el diseño y simulación del recolector utilizando componentes piezoeléctricos como transductores de energía, pero también utilizados como cantilevers que, con la ayuda de una masa en el extremo, se consigue trabajar a la frecuencia de interés. En este trabajo veremos cuánta potencia mecánica genera el sistema vibracional con las características diseñadas, cuánta potencia eléctrica se consigue extraer, y si ésta es suficiente para alimentar un nodo sensor inalámbrico.

Vibrational mechanical energy harvesting is receiving considerable interest as a power source for powering wireless sensor nodes. This project presents the design and modeling of a mechanical energy harvester from the definition of the source of vibrations, to the design and simulation of the harvester using piezoelectric components as energy transducers, but also used as cantilevers which, with the help of a mass at the free end, it manage to work at the frequency of interest. In this work we will see how much mechanical power the vibrational system generates with the designed characteristics, how much electrical power it can extract, and if this is enough to power a wireless sensor node.



# Resum

En l'actualitat, un dels reptes de la comunitat científica més estudiats, i en procés de desenvolupament continu, és el d'estalviar energia i trobar noves fonts d'energies renovables. Les fonts d'energia ambiental són les més estudiades i les que ofereixen la millor solució per aprofitar l'energia dissipada d'altres sistemes que ens envolten, pràcticament sense cost i que a més a més podem trobar en qualsevol lloc i no s'esgota. D'aquestes energies hi ha una varietat considerable, però el cas que ens ocupa per aquest treball de fi de grau són les fonts d'energia mecànica, concretament l'energia vibracional, que és una molt bona opció per recol·lectar una petita quantitat d'energia ambiental, dissipada per un sistema vibracional, que es pot fer servir per alimentar petits nodes sense fils (WSN) de baix consum, sense la necessitat de bateries. Aquest treball se centra en el disseny i modelització d'un recol·lector d'energia mecànica des de la definició de la font de vibracions (una motocicleta de gran cilindrada i motor de quatre temps), la presa de mesures (freqüència i acceleració de les vibracions mecàniques), validació de les mesures i definició del sistema equivalent electromecànic, caracterització de l'aplicació final (definim quatre freqüències d'interès per alimentar el WSN en funció del tipus de conducció de la motocicleta per assegurar alimentació pràcticament contínua) fins el disseny i simulació del recol·lector fent servir components piezoelèctrics com a transductors d'energia, però també utilitzats com a cantilevers (recol·lector d'energia vibracional), que amb l'ajuda d'una massa a l'extrem (gràcies a l'efecte mass-molla), s'aconsegueix que treballin a la freqüència d'interès.





# Índex

<b>Abstract</b>	<b>i</b>
<b>Resum</b>	<b>iii</b>
<b>Llista de figures</b>	<b>ix</b>
<b>Llista de taules</b>	<b>xi</b>
<b>1 Introducció</b>	<b>1</b>
1.1 Estat de l'art . . . . .	1
1.2 Motivació i Objectius . . . . .	2
1.3 Sistema Energy Harvesting . . . . .	3
1.4 Tipus de fonts d'energia . . . . .	4
1.5 Transductors electromecànics . . . . .	6
<b>2 Definició i mesures de l'Energy Harvester</b>	<b>7</b>
2.1 Estudi del sistema de vibracions . . . . .	7
2.2 Mesures del sistema de vibracions . . . . .	8
2.3 Elecció de les dades d'interès . . . . .	18
2.4 Modelització del sistema amb les dades . . . . .	19
2.5 Càlculs de disseny . . . . .	22
<b>3 Potència mecànica i elèctrica</b>	<b>27</b>

3.1	Càlcul del model electromecànic . . . . .	27
3.2	Simulacions del model electromecànic . . . . .	29
3.3	Càlcul del model de transducció . . . . .	35
3.4	Simulacions del model de transducció . . . . .	39
<b>4</b>	<b>Resultats i conclusions</b>	<b>51</b>
4.1	Resultats . . . . .	51
4.2	Conclusions . . . . .	54
	<b>Bibliografia</b>	<b>i</b>

# Índex de figures

1.1	Fonts d'energia comunes i Energy Harvesting (creada per Design World Staff) . .	3
1.2	Sistema de blocs d'un Energy Harvesting . . . . .	4
1.3	Energia dissipada i reaprofitada (creat per Reiko Kusumoto) . . . . .	5
1.4	Exemples de transductors per implementar micròfons i altaveus . . . . .	6
2.1	Fitxa Tècnica Kawasaki Z750R ABS Black Edition 2012 (de Kawasaki) . . . . .	8
2.2	Ubicació i eixos de les mesures . . . . .	9
2.3	Acceleració de les vibracions en funció de les revolucions . . . . .	11
2.4	Freqüència de vibracions en funció de les revolucions . . . . .	12
2.5	Quocient freqüència del motor i de vibracions en funció de les revolucions . . . . .	14
2.6	Cigonyal Kawasaki Z750R . . . . .	14
2.7	Coefficient freqüències . . . . .	17
2.8	Freqüències corregides . . . . .	18
2.9	Massa-molla i massa-cantilever . . . . .	21
3.1	Circuit equivalent electromecànic RLC del cantilever . . . . .	28
3.2	RLC mecànic 1000 rpm . . . . .	30
3.3	Resposta freqüencial de la potència mecànica a 1000 rpm . . . . .	30
3.4	RLC mecànic 3500 rpm . . . . .	31
3.5	Resposta freqüencial de la potència mecànica a 3500 rpm . . . . .	31
3.6	RLC mecànic 5000 rpm . . . . .	32

3.7	Resposta freqüencial de la potència mecànica a 5000 rpm . . . . .	32
3.8	RLC mecànic 7000 rpm . . . . .	33
3.9	Resposta freqüencial de la potència mecànica a 7000 rpm . . . . .	33
3.10	RLCs mecànics de tot el disseny . . . . .	34
3.11	Resposta freqüencial de la potència mecànica a tot el disseny . . . . .	34
3.12	Circuit transducció mecanico-elèctrica . . . . .	35
3.13	Circuit transducció mecanico-elèctrica connexió paral·lel . . . . .	37
3.14	Circuit transducció mecanico-elèctrica connexió sèrie . . . . .	37
3.15	Transducció mecanico-elèctrica a 36,9 Hz amb 1 piezo . . . . .	39
3.16	Potència obtinguda amb un piezo a 36,9 Hz calculada amb I . . . . .	40
3.17	Potència obtinguda amb un piezo a 36,9 Hz calculada amb V . . . . .	40
3.18	Escombrat amb la impedància de càrrega . . . . .	41
3.19	Potència en funció de la impedància de càrrega a 36,9Hz amb 1 piezo . . . . .	42
3.20	Transducció mecanico-elèctrica a 36,9 Hz amb 2 piezos en sèrie . . . . .	42
3.21	Potència transduïda a 36,9 Hz amb 2 piezos en sèrie . . . . .	43
3.22	Transducció mecanico-elèctrica a 36,9 Hz amb 2 piezos en paral·lel . . . . .	43
3.23	Potència transduïda a 36,9 Hz amb 2 piezos en paral·lel . . . . .	44
3.24	Transducció mecanico-elèctrica a 109,3 Hz amb 5 piezos en sèrie . . . . .	45
3.25	Potència transduïda a 109,3 Hz amb 5 piezos en sèrie . . . . .	45
3.26	Transducció mecanico-elèctrica a 160,9 Hz amb 8 piezos en sèrie . . . . .	46
3.27	Potència transduïda a 160,9 Hz amb 8 piezos en sèrie . . . . .	47
3.28	Transducció mecanico-elèctrica a 225,0 Hz amb 10 piezos en sèrie . . . . .	48
3.29	Potència transduïda a 225,0 Hz amb 10 piezos en sèrie . . . . .	49
3.30	Potència elèctrica sistema sencer . . . . .	49
4.1	Potència elèctrica per ciutat i parades ocasionals . . . . .	53
4.2	Potència elèctrica per autopista i corbes . . . . .	53
4.3	Potència per alimentar components electrònics normals . . . . .	55

4.4	Potència per alimentar components electrònics de baix consum . . . . .	56
-----	--	----



# Índex de taules

2.1	Acceleració i freqüència mesurades . . . . .	10
2.2	Freqüències mesurada i esperada . . . . .	13
2.3	Correcció de les freqüències de vibracions . . . . .	16
2.4	Dades finals disseny . . . . .	20
2.5	Datasheet FS-2513P . . . . .	22
2.6	Variables per incrementar la massa . . . . .	23
2.7	Calcul “k” i masses per diferents piezos . . . . .	24
2.8	Càlcul massa per $l=0,025\text{m}$ . . . . .	24
2.9	Quocient massa (m/m.ef.p.) . . . . .	25
2.10	Piezos per cada freqüència . . . . .	26
2.11	Massa per afegir als piezos . . . . .	26
3.1	Valors RLC . . . . .	29
3.2	Potència mecànica . . . . .	35
3.3	Valors RLC 36,9Hz amb un piezo . . . . .	38
3.4	Valors transformador mecanico-elèctric . . . . .	38
3.5	Potència en funció de la impedància de càrrega . . . . .	41
4.1	Resultats d’interès simulacions . . . . .	51
4.2	Recopilació consum (W) components electrònics (dades recollides d’exercicis de [24]) . . . . .	54





# Capítol 1

## Introducció

En aquest capítol s'estudia l'estat de l'art i defineixen les motivacions i objectius, a més a més s'introdueixen conceptes fonamentals que defineixen aquest projecte, així com l'Energy Harvesting, diferents fonts d'energia dissipada d'altres sistemes que ens envolten, i algunes possibilitats de transducció d'energia.

### 1.1 Estat de l'art

La recollida d'energia (energy harvesting) es defineix com la captació de petites quantitats d'energia, d'una o varies fonts d'energia que ens envolten, i l'emmagatzemantge per al seu posterior consum. Quan parlem de sistemes d'energy harvesting o energy scavenging, fem referència a sistemes encarregats de la recuperació, i l'aprofitament dels diferents tipus d'energia que es troben a l'ambient i normalment es desaprofiten. Els sistemes d'energy harvesting s'encarreguen de transformar els diferents tipus d'energia (solar, tèrmica, eòlica, mecànica en forma de vibracions, etc.) en energia elèctrica per al seu posterior aprofitament. Es pot fer una classificació de les diferents energies susceptibles de ser aprofitades mitjançant energy harvesting i els seus respectius transductors. L'energia procedent de les vibracions, que és la que es tracta en aquest treball, és una de les fonts d'energia més fàcils de trobar en estructures civils, màquines o el cos humà. Per a l'aprofitament de l'energia en forma de vibracions els tres sistemes bàsics de conversió en energia elèctrica són: transductors electromagnètics (bobina magnètica), transductors electrostàtics (condensadors), transductors piezoelèctrics (components piezoelèctrics). De les diferents formes de convertir energia en forma de vibracions mecàniques en energia elèctrica, els sistemes piezoelèctrics són una de les tècniques més efectives i pràctiques. Els principals avantatges d'utilitzar materials i sistemes piezoelèctrics (comparat amb els transductors electromagnètics i electrostàtics) són la seva major densitat de potència i la seva fàcil aplicació. A causa del creixent ús de dispositius sense fils, la recollida d'energia ha destacat com una alternativa

a l'ús de bateries convencionals, gràcies a ser una font d'energia neta i renovable. Els dispositius sense fils són susceptibles per aprofitar les diferents tecnologies de recollida d'energia, així com també ho són les tecnologies MEMS [1], [2] i [3], sensors per a la monitoratge de la salut, sensors per a aplicacions mèdiques [4], [5] i [6] o monitoratge de pressió i temperatura de les rodes en vehicles. L'evolució tecnològica en les últimes dècades d'aquests dispositius electrònics, ha propiciat que aquests siguin cada cop de mida més reduïda i menor consum de potència. Aquests avenços fan que els dispositius electrònics siguin cada cop més portables, essent necessària una gran autonomia atès que fem servir aquests dispositius (reproductors de música, sensors, telèfons mòbils, etc.) de forma contínua al llarg del dia. Això ha suposat un increment en la investigació de tecnologies d'energy harvesting, a causa de la necessitat de trobar una manera d'augmentar aquesta autonomia sense haver de dependre únicament de bateries convencionals. D'altra banda, com s'ha comentat anteriorment, en tractar-se d'una font d'energia neta i renovable, l'energy harvesting es posiciona com una opció amigable amb el medi ambient, ja que a mesura que creix la demanda de dispositius electrònics portables, creixen al seu torn les deixalles electròniques de dispositius que es queden obsolets en un curt termini de temps i el més contaminant d'aquestes deixalles són les bateries. Aquest focus de contaminació ambiental es podria reduir fent ús de sistemes de energy harvesting generadors d'electricitat en substitució de les bateries convencionals o com a part de sistemes híbrids encastats per a la recàrrega de bateries donant-los una vida útil més llarga. En els últims anys s'han publicat multitud d'articles i investigacions amb diferents tipus d'aplicacions d'energy harvesting relacionades amb les vibracions i altres energies dissipades, tal com descriuen els articles disponibles a la bibliografia [3], [7], [8], [9], [10], [11], [12], [13] i [14] .

## 1.2 Motivació i Objectius

Aquest treball de fi de grau sorgeix de la motivació de dissenyar i implementar un sistema que sigui capaç de substituir les fonts convencionals d'energia que habitualment es fan servir als dispositius sense fils. Partint d'aquesta idea, s'ha dissenyat un sistema d'Energy Harvesting que té com a objectiu aprofitar les vibracions mecàniques d'una motocicleta per alimentar sistemes sense fils, que, per exemple, permeti mesurar la temperatura o pressió de les rodes (molt important quan se circula amb una motocicleta per carreteres de corbes), sense haver-hi de connectar el sistema a la bateria del vehicle, canviar una pila que es troba en una localització de difícil accés, també per motius ambientals, ja que ens estalviariem fonts d'energia contaminants. Per les característiques de la font d'energia, es farà servir un component piezoelèctric, en forma de cantilever (trampolí), que basa el seu funcionament en proporcionar una tensió quan el deformem amb les vibracions de la motocicleta. La finalitat d'aquest projecte és demostrar, mitjançant simulacions del disseny que realitzem, que amb la potència que s'extrau amb aquest sistema, som capaços d'alimentar un node sensor bàsic de baix consum.

### 1.3 Sistema Energy Harvesting

En l'actualitat les necessitats energètiques del món són cada cop més grans, la demanda d'energia s'incrementa a conseqüència de l'avenç tecnològic, i a causa d'això es tendeix a buscar solucions a aquestes necessitats que no només siguin òptimes, eficients i de baix cost, sinó que també siguin sistemes sostenibles, que no afectin el medi ambient i a més que aprofitin les fonts d'energia que aquest ens proveeix (figura 1.1). Les xarxes de sensors sense fils actualment estan immerses en una varietat d'aplicacions com ho són el monitoratge ambiental, el mapeig de biodiversitat, edificis o ponts intel·ligents, agricultura de precisió i medicina [4], [5] i [6], entre d'altres. La seva acollida s'ha incrementat amb l'ús de fonts d'energia elèctrica que són capaços de treballar per llargs períodes de temps. En conseqüència, les tècniques d'adquisició de l'energia de l'ambient o el que es coneix com a Energy Harvesting, esdevenen un complement ideal no només per a cada un dels nodes remots sense fils dins d'una xarxa, sinó per a qualsevol dispositiu perifèric que requereix aquest sistema. L'ús d'aquesta tècnica en aquests dispositius es fonamenta en el seu baix consum de potència. En aquest context, aquest projecte planteja la implementació d'un node sensor alimentat per Energy Harvesting, en el qual es busca el mínim consum d'energia per aconseguir una operació autònoma del dispositiu, aconseguint amb això una disminució del cost de manteniment i canvi constant de bateries. A més, el sistema a implementar ofereix la possibilitat de ser utilitzat en aplicacions on es requereixi realitzar mesures remotes en espais i situacions, així com un vehicle en marxa, o allà on l'accés a la xarxa elèctrica pot ser complicada i costosa.

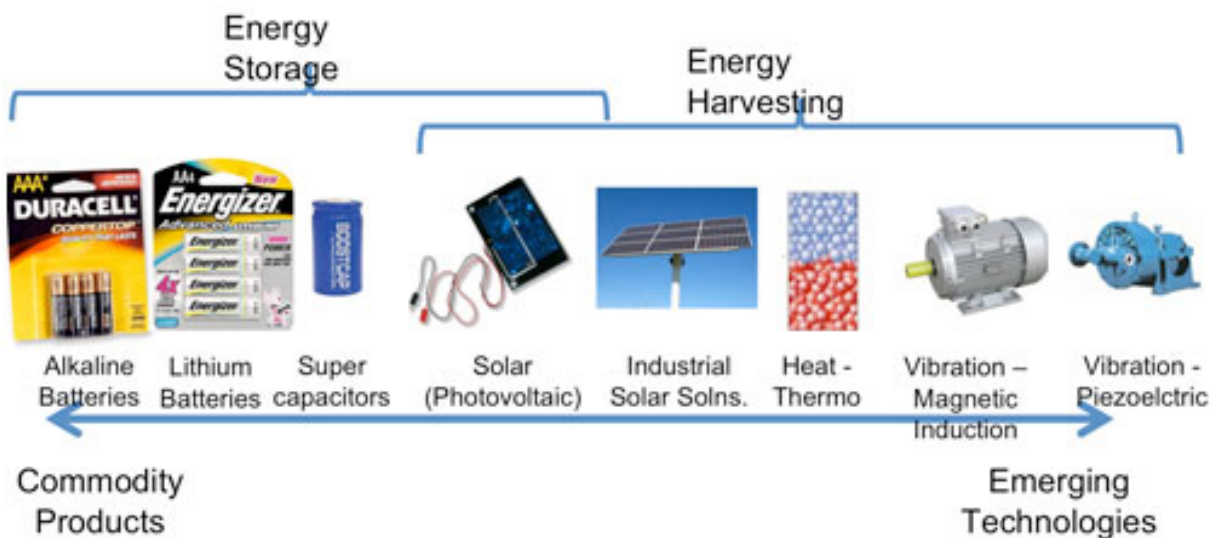


Figura 1.1: Fonts d'energia comunes i Energy Harvesting (creada per Design World Staff)

Ara que ja sabem amb què tractem i quin és el propòsit d'aquest projecte, abans de dissenyar qualsevol sistema, hem de dividir-lo en blocs diferenciats amb tasques pròpies que conjuntament proporcionen el resultat que desitgem. Per això al nostre sistema s'han de trobar els següents blocs (figura 1.2):

- Una font d'energia dissipada, que puguem aprofitar.
- Un dispositiu per fer una conversió de l'energia, és a dir, un dispositiu que sigui capaç de transformar l'energia aprofitada en energia elèctrica, com per exemple les cel·les fotovoltaïques, dinamos, piezoelèctric, etc.
- Un mòdul de col·lecció d'energia, emmagatzematge i administració d'energia per al sistema que volem alimentar. En el nostre cas es tracta aquest bloc amb una capacitat.
- Aplicació final d'aquesta energia recol·lectada, és a dir el sistema que es vol alimentar i aprofitarà aquesta energia. En aquest cas, tractarà d'alimentar un node sensor sense fils de baix consum.

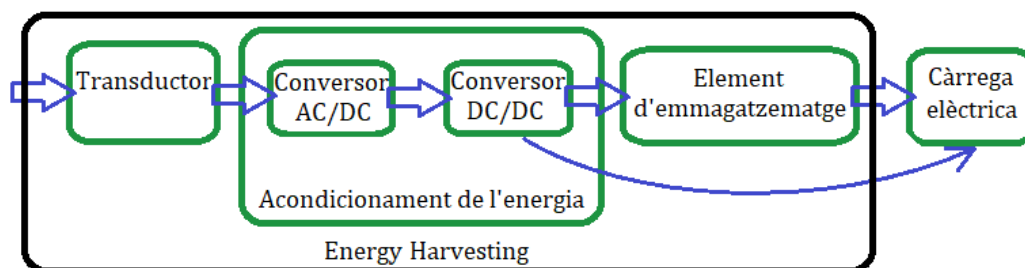


Figura 1.2: Sistema de blocs d'un Energy Harvesting

## 1.4 Tipus de fonts d'energia

S'ha d'interpretar quin tipus d'energia podem aprofitar de cada sistema en concret, ja que segons l'energia dissipada pel sistema i el seu entorn, convé aprofitar alguna o més d'una. Per això diferenciem alguns tipus d'energia dissipada:

- Energia mecànica: Mitjançant elements ressonadors es poden convertir les vibracions mecàniques de l'entorn en energia per alimentar nodes sensors de baixa potència. Aquesta energia vibracional s'aprofita més quan el transductor, convertidor electromecànic, està dissenyat per la mateixa freqüència de vibració que la font [1], [7], [9], [10] i [11].
- Energia solar: És una solució molt innovadora tant a petita com a gran escala per anar substituint els antics sistemes d'alimentació elèctrica mitjançant transducció fotovoltaica, tot

i això, hi ha molts reptes en la recollida d'energia solar; com la intermitència de l'energia disponible, la predicció d'energia solar, problemes tèrmics, l'eficiència de la conversió del panell solar i altres problemes ambientals. Avui dia, amb la tecnologia de la qual disposem, només s'aprofita un petit percentatge de l'energia solar però també és una de les que més quantitat d'energia proporciona [15].

- Energia tèrmica: L'energia tèrmica és la manifestació de l'energia en forma de calor. En tots els materials els àtoms que formen les seves molècules estan en continu moviment sigui traslladant-se o vibrant. Aquest moviment de les partícules implica que els àtoms tinguin una determinada energia cinètica a la qual nosaltres anomenem calor, energia tèrmica o energia calorífica. Aquesta forma d'energia es pot transmetre d'un cos a un altre seguint les lleis de la termodinàmica de tres maneres diferents: transmissió de calor per radiació, transmissió d'energia tèrmica per conducció, transmissió d'energia calorífica per convecció. Per aprofitar aquesta energia s'ha de tenir en compte que ha d'haver-hi una diferència de temperatura notòria i es necessiten transductors termoelèctrics [16].

- Energia electromagnètica: L'energia magnètica al voltant d'un conductor es pot aprofitar mitjançant una rectena. Aquest tipus de recol·lectors d'energia s'utilitzen per alimentar sensors de control muntats als cables o sistemes de xarxa. El disseny del recol·lector d'energia ha de ser tal, que la tensió de corrent continu obtingut sigui capaç d'alimentar com a mínim un sensor de baix consum [2], [17], [18] i [19].

A la figura 1.3 es poden observar alguns exemples de les fonts d'energia comentades en aquest apartat i com es reaprofiten en forma d'energia elèctrica.



Figura 1.3: Energia dissipada i reaprofitada (creat per Reiko Kusumoto)

## 1.5 Transductors electromecànics

Per aprofitar l'energia dissipada que fins ara s'ha comentat, necessitem un tipus de transductor que aprofiti l'energia reciclada i la transformi en energia elèctrica [20]. Per al cas de l'energia vibracional, hi ha tres tipus de transductors que generalment es fan servir. Transductors electrostàtics, transductors electromagnètics i transductors piezoelèctrics.

- Electrostàtics: Quan la separació entre les plaques del condensador varia, també varia la seva capacitat, cosa que també provoca una variació en el voltatge entre les plaques. De manera igual, quan una de les plaques rep una quantitat variable de càrrega elèctrica, la força d'atracció cap a l'altre placa, varia, i com a conseqüència, aquesta vibra. Aquests components es fan servir molt en micròfons i altaveus [21].

- Electromagnètics: Consta d'una peça de material magnètic que es mou a causa de les vibracions que exerceixen una força sobre ella i, en paral·lel, trobem una espira que es troba en repòs. D'aquesta manera, es transdueix l'energia mecànica vibracional exercida sobre el material magnètic en energia elèctrica amb [2], [17] i [19].

- Piezoelèctrics: Quan un material piezoelèctric es deforma, apareix una quantitat de càrrega positiva a un costat i la mateixa quantitat de càrrega negativa a l'altre costat. Aquesta polarització pot ésser recollida per un circuit electrònic. D'igual manera, si es polaritza el material piezoelèctric, aquest es deformarà [22] i [23].

A la figura 1.4 veiem un exemple dels transductors que s'acaben de comentar, que treballen amb energia vibracional, igual que en el nostre sistema, però en el camp acústic. En aquest cas, és un exemple d'implementació de micròfons i altaveus però, de manera similar, es poden fer servir en el cas que ens ocupa per transduïr energia.

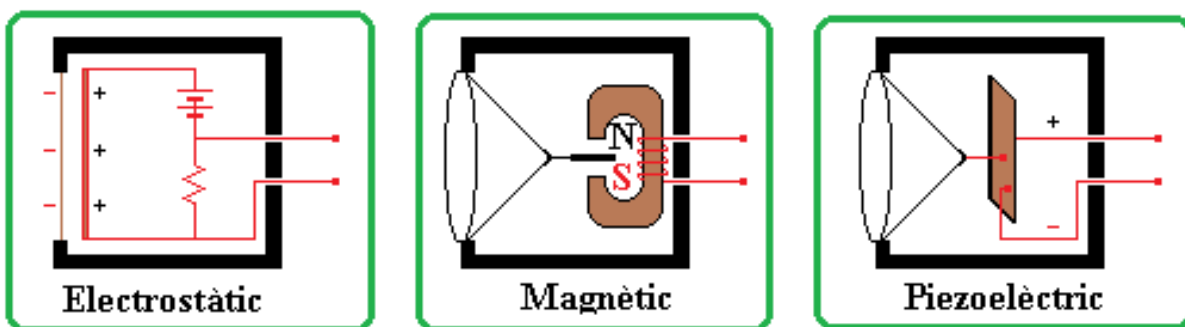


Figura 1.4: Exemples de transductors per implementar micròfons i altaveus

## Capítol 2

# Definició i mesures de l'Energy Harvester

En aquest capítol s'estudien les característiques de la motocicleta, que actua com a font de vibracions, per conèixer el seu comportament i extreure correctament les mesures necessàries i treballar amb aquestes dades per la realització del disseny amb la major aproximació possible a la realitat.

### 2.1 Estudi del sistema de vibracions

El sistema que es vol dissenyar està pensat per implementar-lo en motocicletes per així poder alimentar nodes sensors sense fils amb les vibracions del motor, ja que per diferents motius comentats anteriorment, el fet que aquests nodes requereixin alimentació sense fils i una bateria no és el més convenient.

La motocicleta que ha estat objecte d'aquest treball és de la marca Kawasaki, model Z750R ABS Black Edition de l'any 2012. És important tenir coneixement de quina és la font de vibracions amb la que estem treballant i de com es comporta, ja que depenent de la cilindrada, el nombre de cilindres, el tipus de funcionament, potència i altres característiques tècniques, les vibracions que es mesuren poden variar. Per tant, s'ha de tenir en compte que aquest treball és explícitament per fer-lo servir amb aquesta motocicleta i, com es veura més endavant, per l'estil de conducció. Però, un cop realitzat aquest projecte, l'adaptació a altres models i/o altres estils de conducció consisteix a fer de nou les mesures necessàries i escollir les freqüències oportunes segons el que es busca. A la figura 2.1 hi és la fitxa tècnica de la motocicleta.

## Ficha técnica Kawasaki Z750R Black Edition 2012

### Motor

Tipo de motor: 4 cilindros en línea, refrigeración líquida

Cilindrada: 748 cm<sup>3</sup>

Diámetro x Carrera: 68.4 x 50.9 mm

Potencia máxima: 77.7 kW (106 CV) / 10,500 rpm

Par motor máximo: 78.0 N•m {8.0 kgf• m} / 8,300 rpm

Relación de compresión: 11.3:1

Sistema de válvulas: DOHC, 16 válvulas

Sistema de Alimentación: Inyección electrónica: ø32 mm x 4 (Keihin) con mariposas ovales

Encendido: Digital

Arranque: Eléctrico

Lubricación: Forzada, carter húmedo

Embrague: Multidisco húmedo

Transmisión: 6 velocidades

Transmisión final: Cadena sellada

### Parte ciclo

Tipo de chasis: Espina dorsal tubular (con subchasis motor), acero de alta tensión

Ancho de vía: 24.5° / 103 mm

Suspensión delantera: Horquilla invertida de 41mm, con ajustes en extensión y precarga

Recorrido: 120 mm

Suspensión, trasera: uni-Trak con depósito de gas externo Ajustable en extensión y precarga

Recorrido: 134 mm

Ángulo de dirección (izquierda / derecha): 31° / 31°

Figura 2.1: Fitxa Tècnica Kawasaki Z750R ABS Black Edition 2012 (de Kawasaki)

## 2.2 Mesures del sistema de vibracions

Ara que es coneix el sistema de vibracions, s'han de fer les mesures necessàries per poder dissenyar un sistema que sigui capaç d'alimentar un petit node sensor. Per això les dades que es necessiten saber són l'acceleració i la freqüència de vibracions.



Per fer les mesures, es fa servir una aplicació per al mòbil que es diu “myFrequency Version2.1” que permet fer ambdues mesures simultàniament. Per tant, com es mostra a la figura 2.2, primer de tot es col·loca de la manera més fixa possible, però tractant de no influir en les mesures, el mòbil al chasis de la motocicleta de manera paral·lela al terra; que és la posició en la que anirà instal·lat el sistema un cop dissenyat i fabricat. Els eixos que mostren la figura, són els eixos que dóna l’aplicació per fer la mesura. És important tenir en compte els eixos pel fet que tindrem valors diferents d’acceleració per a cadascú.

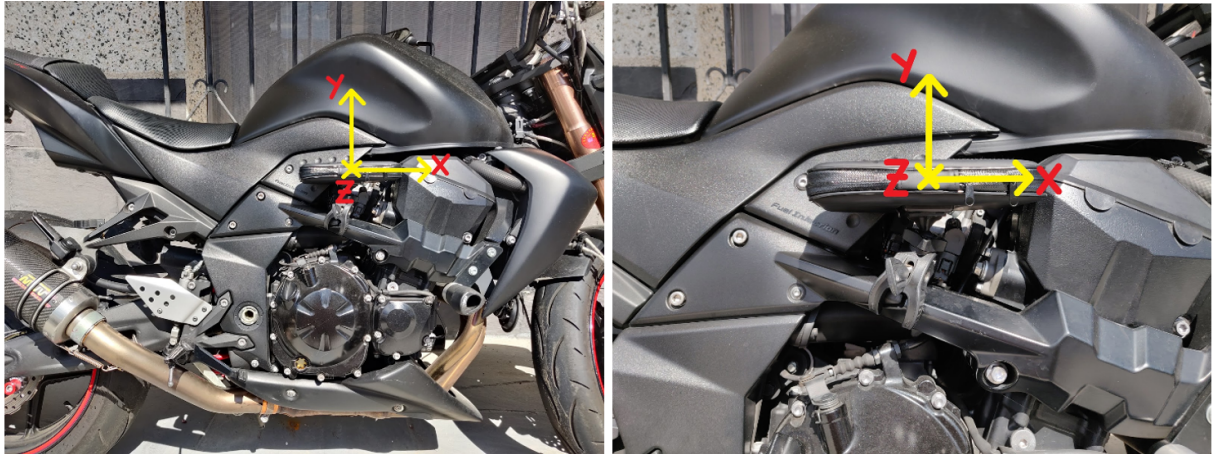


Figura 2.2: Ubicació i eixos de les mesures

En aquest cas, l'eix d'interès per treballar és el “Y”. Però abans de començar amb les mesures i mostrar-les, s'ha de pensar quines dades es volen conèixer. En aquest projecte es prenen les mesures començant pel ralenti, equivalent a 1000 rpm fins a 9000 rpm, equivalents a una acceleració de la motocicleta molt elevada que només arribarem en ocasions excepcionals. L'interval entre mesures que s'han pres és cada 500 rpm, per així poder interpretar i treballar millor amb les dades i aproximar-nos el màxim possible a la realitat.

Pel que fa al procediment de mesura, cal destacar que, per fer els intervals de 500 rpm, en comptes de fer-ho manualment (cosa que condueix a un error gran i poc controlat), s'ha fet variant el cabal de la vàlvula d'admissió de la motocicleta de manera mecànica per mantenir les revolucions d'interès durant el temps oportú (en aquest cas ha sigut d'aproximadament 10 segons per cada mesura). Per tant, amb el procediment definit, a la taula 2.1 es mostren les mesures obtingudes.

Revolucions motor(rpm)	Acceleració( $m/s^2$ )	Freqüència vibracions mesurades(Hz)
1000	1,533	36,9
1500	1,351	48,8
2000	1,274	60,1
2500	0,762	78,9
3000	0,925	96,6
3500	1,387	109,3
4000	1,167	131,8
4500	1,603	139,6
5000	2,912	160,9
5500	1,190	174,0
6000	1,552	187,5
6500	2,551	192,2
7000	4,139	175,4
7500	3,965	168,1
8000	2,630	149,4
8500	2,232	129,6
9000	1,571	114,8

Taula 2.1: Acceleració i freqüència mesurades

Veiem els resultats de la taula anterior als gràfics 2.3 i 2.4 respectivament, per tractar d'entendre què succeeix, per què succeeix i si està tot correcte.

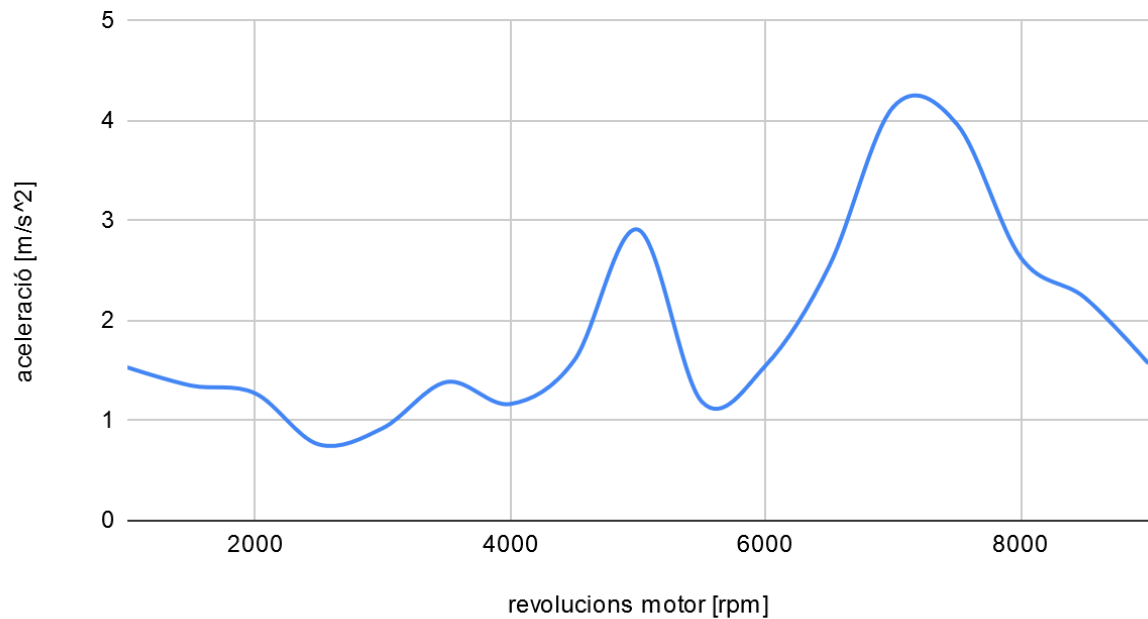
acceleració [m/s<sup>2</sup>] i revolucions motor [rpm]

Figura 2.3: Acceleració de les vibracions en funció de les revolucions

A la figura 2.3 es pot apreciar l'acceleració mesurada en funció de les revolucions del motor. Cal destacar que els pics més alts, realment són justificats, ja que prenent les mesures, abans de mirar els resultats per afegir-los a la taula, ja es notava una vibració molt més forta, igual amb els pics més baixos i els punts intermitjos. Per tant, amb això ja podem intuir una mesura correcta o almenys, una mesura coherent amb la realitat.

D'altra banda, si volem interpretar el per què d'aquests canvis que es mesuren i es noten, s'ha d'anar a la fitxa tècnica, que és la responsable d'això, ja que la barreja de tots els factors que dissenyen aquest motor, li donen aquesta característica única respecte a l'acceleració de les vibracions en funció de les revolucions del motor. Probablement, motors de la mateixa marca proporcionin un gràfic similar al de la figura 2.3, però un motor de la mateixa categoria, d'altra marca, dibuixaria una gràfica diferent.

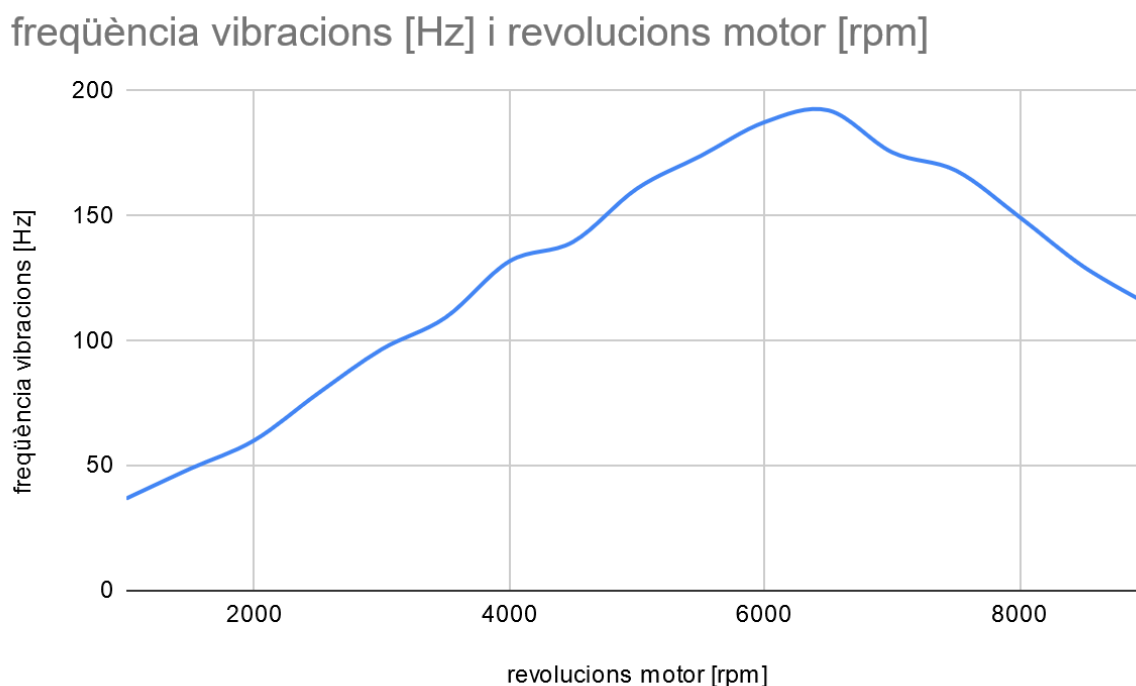


Figura 2.4: Freqüència de vibracions en funció de les revolucions

A la figura 2.4 es pot apreciar la freqüència de vibracions mesurada en funció de les revolucions del motor. Com a primera reflexió, el primer que s'espera abans de fer les mesures és que la freqüència de vibracions incrementi a mesura que incrementem les revolucions i, a més, de manera lineal. Ens trobem que fins a 6000 rpm hi ha un comportament molt similar a l'esperat, però a partir d'aquí la corba es doblega i comença a baixar la freqüència mesurada en comptes de continuar incrementant. Aquesta resposta en un principi sembla estranya i planteja dues qüestions; per què passa això i per què a partir de 6000 rpm.

Per tractar de respondre aquestes preguntes que es plantegen, amb les dades de la taula 2.1, es calcula la taula 2.2 que es mostra a continuació:

R. motor(rpm)	F. motor(Hz)	F. vibracions (Hz)	F. mesurades / F. motor
1000	16,7	36,9	2,214
1500	25,0	48,8	1,952
2000	33,3	60,1	1,803
2500	41,7	78,9	1,894
3000	50,0	96,6	1,932
3500	58,3	109,3	1,874
4000	66,7	131,8	1,977
4500	75,0	139,6	1,861
5000	83,3	160,9	1,931
5500	91,7	174,0	1,898
6000	100,0	187,5	1,875
6500	108,3	192,2	1,774
7000	116,7	175,4	1,503
7500	125,0	168,1	1,345
8000	133,3	149,4	1,121
8500	141,7	129,6	0,915
9000	150,0	114,8	0,765

Taula 2.2: Freqüències mesurada i esperada

A la taula 2.2, es calcula l'equivalent de les revolucions en freqüència. Per fer aquest càlcul és molt simple pel fet que les revolucions es defineixen en les voltes que es fan cada minut (60 segons), en canvi la freqüència es defineix com les voltes que es fan per segon. Per tant, de les pròpies definicions dels termes, es pot deduir que  $1\text{Hz}=60\text{rpm}$ . Així que per fer la transformació de la segona columna, només s'han de dividir entre 60 els valors de la primera columna.

Analitzant els resultats d'aquesta transformació, es veu que encaixen més amb el que s'espera trobar a les mesures realitzades. Per veure la diferència entre la freqüència esperada i la freqüència mesurada es fa el quocient d'aquestes, com mostra la columna 4; així es veu quina relació tenen i quina explicació pot trobar-hi. La següent figura representa aquesta columna per tenir una interpretació més visual.

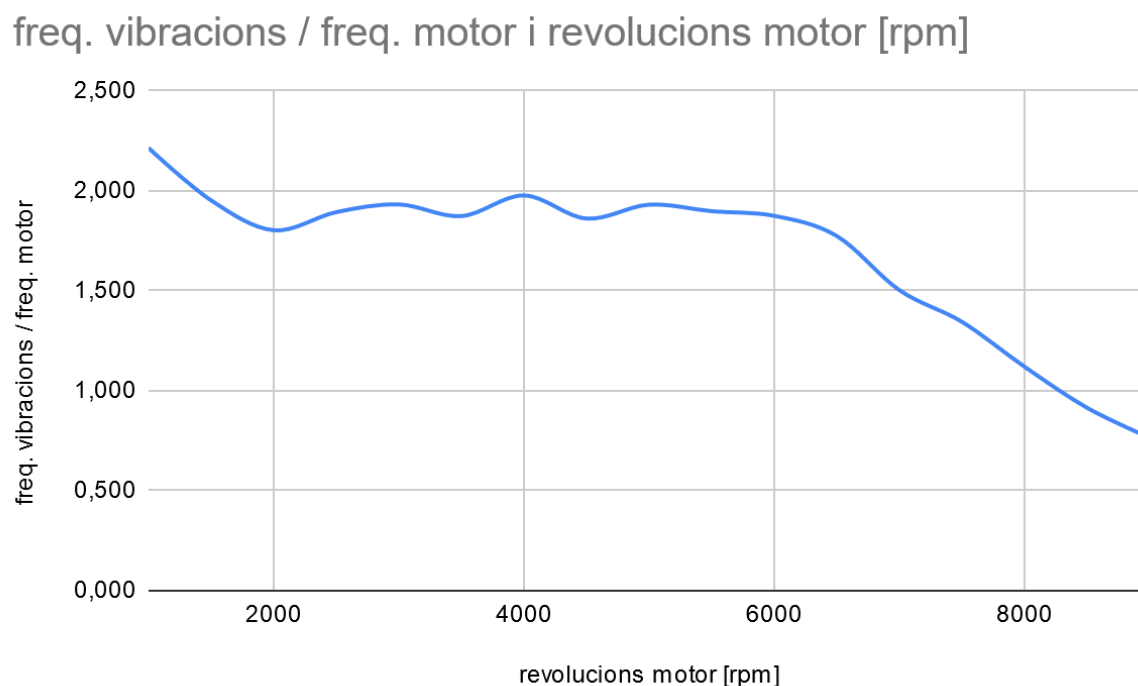


Figura 2.5: Quocient freqüència del motor i de vibracions en funció de les revolucions

A la figura 2.5, es troba representat el quocient entre la freqüència del motor i la freqüència mesurada en funció de les revolucions del motor. Com es pot apreciar, fins a les 6000rpm és bastant clar un factor 2, però a partir d'aquí el factor comença a baixar.

Per trobar la causa d'aquestes dades, després de considerar moltes possibilitats, primer de tot, s'estudia el funcionament del motor d'aquesta motocicleta. Es troba que té 4 cilindres que treballen de dos en dos (els dos centrals i els dos laterals a l'hora) amb un desfasament de  $180^\circ$ , tal i com s'aprecia a la figura 2.6 que mostra el cigonyal que marca el recorregut dels pistons a l'interior del cilindre.



Figura 2.6: Cigonyal Kawasaki Z750R

Per tant, aquesta dada explica el perquè d'aquest factor tan proper a 2, ja que per cada volta que fa el cigonyal (dada que marca el tacòmetre de la motocicleta), realment hi són 2 cops els pistons a la posició més alta i més baixa del motor. Per tant això justifica les mesures de fins a 6000 rpm.

Però encara s'ha de descobrir què passa a partir d'aquestes revolucions. Investigant l'aplicació amb la que s'han fet les mesures, es troba que la freqüència de mostreig màxima amb la que treballa és de 400Hz. Per tant, partint del criteri de Nyquist, que diu que la freqüència de mostreig ha de ser igual o més gran que dues vegades la freqüència mesurada, amb l'aplicació la mesura més gran que podem fer és de 200Hz.

Per tant, aplicant que la freqüència de vibracions serà el doble de la del motor i que la freqüència més gran que pot mesurar l'aplicació sense aliàsing es de 200Hz. Tenim que les mesures són vàlides fins als 100Hz del motor que, llegint la taula 2.2, és equivalent a les 6000 rpm que generaven conflicte.

Com a aclariment, l'aliàsing no afecta l'amplitud, per tant les dades mesurades de l'acceleració segueixen sent vàlides.

Per tant, a la taula 2.3 es corregeixen les dades de la taula 2.2:

R. motor (rpm)	F. ideal (Hz)	F. corregides / F. motor (Hz)	F. corregides
1000	33,3	2,214	36,9
1500	50,0	1,952	48,8
2000	66,7	1,803	60,1
2500	83,3	1,894	78,9
3000	100,0	1,932	96,6
3500	116,7	1,874	109,3
4000	133,3	1,977	131,8
4500	150,0	1,861	139,6
5000	166,7	1,931	160,9
5500	183,3	1,898	174,0
6000	200,0	1,875	187,5
6500	216,7	1,928	208,9
7000	233,3	1,928	225,0
7500	250,0	1,928	241,0
8000	266,7	1,928	257,1
8500	283,3	1,928	273,2
9000	300,0	1,928	289,2

Taula 2.3: Correcció de les freqüències de vibracions

A la segona columna es troben les dades de la freqüència de vibracions que s'haurien de trobar idealment, tenint en compte l'estudi i la interpretació anterior. Per fer aquest càlcul, es multiplica la freqüència de motor pel factor ideal (2) que abans s'ha comentat que és a causa del desfasament de  $180^\circ$  que té el cigonyal.

A la tercera columna, es troben les dades de quocient entre la freqüència de vibracions i la freqüència del motor, mantenint les dades mesurades fins a 6000 rpm però de 6000 rpm fins a 9000 rpm es multiplica la freqüència ideal per la mitja del factor que s'ha trobat i validat fins a 6000 rpm. Aquesta mitja dona un factor de 1,928. Per tant, es torna a graficar aquesta dada per veure si s'obté un resultat més satisfactori.



## freq. vibracions / freq. motor i revolucions motor [rpm]

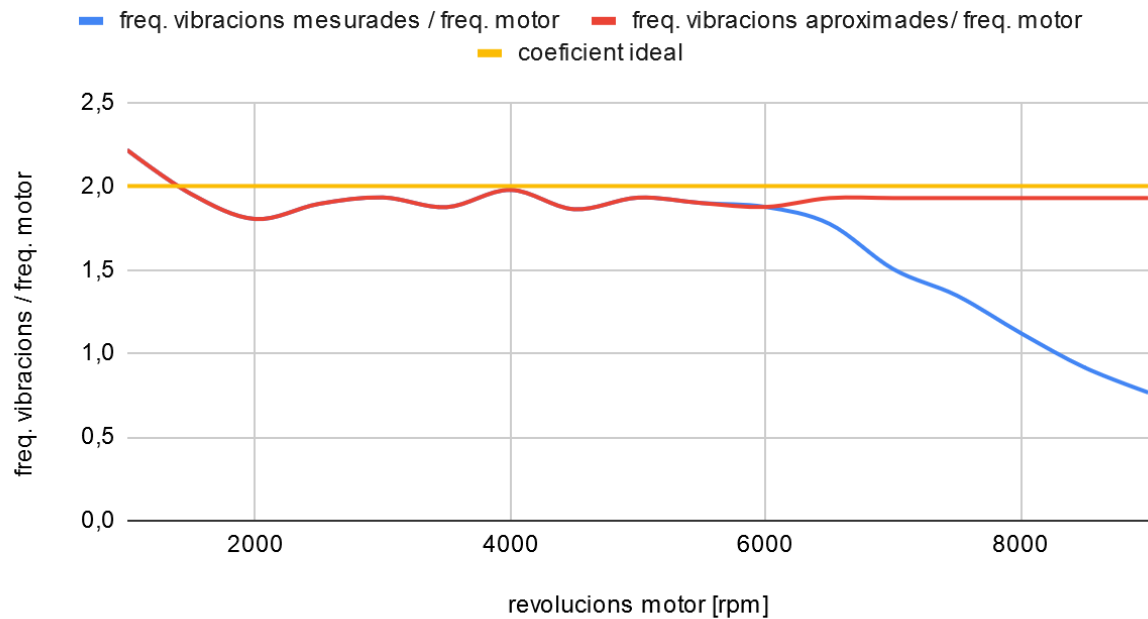


Figura 2.7: Coeficient freqüències

A la figura 2.7, amb blau, es troba el mateix tràfic que hi ha a la figura 2.5, però a diferència d'aquest, hi han dues corbes més per poder analitzar si s'ha fet una bona aproximació del que es pot mesurar amb un freqüencímetre que tingui una freqüència de mostreig superior al doble de les freqüències que volem mesurar. Amb groc hi ha el factor ideal, dos, que la teoria ens indica. Amb color vermell, hi ha la corba de les aproximacions fetes d'acord a l'estudi realitzat que, com es pot veure, és molt propera en totes les freqüències a la línia ideal i a més corregeix l'inconvenient que es troba a les mesures inicials.

Per últim, a la quarta columna de la taula 2.3, es troba l'aproximació de la freqüència que s'hauria de trobar amb un freqüencímetre que tingui una freqüència de mostreig superior al doble de les freqüències que volem mesurar. Aquesta aproximació, es fa amb el factor de la tercera columna. Igual que s'ha graficat el coeficient, es grafica la freqüència per visualitzar bé els resultats.

## freqüència vibracions [Hz] i revolucions motor [rpm]

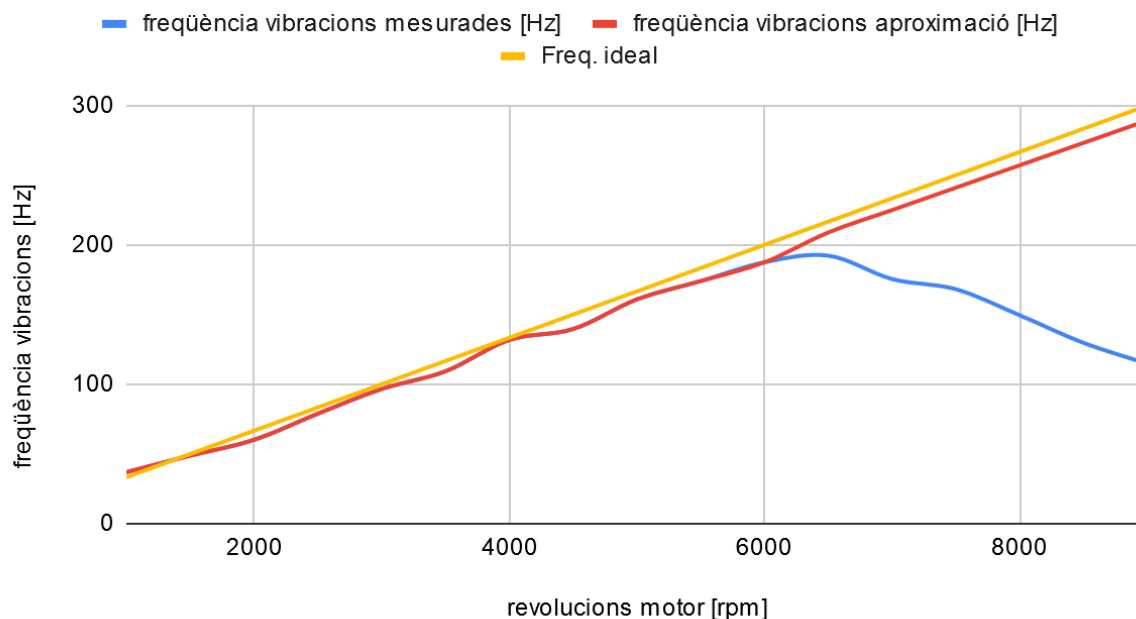


Figura 2.8: Freqüències corregides

A la figura 2.8, amb blau, hi ha el mateix gràfic que a la figura 2.4 però, a diferència d'aquest, hi ha dues corbes més per poder analitzar si s'ha fet una bona aproximació. Amb groc tenim la freqüència ideal de vibracions en funció de les revolucions del motor. En vermell hi ha la freqüència que s'ha aproximat per tenir unes dades més realistes i corregir les limitacions del sistema de mesura. Com es pot apreciar, es pot treballar amb aquestes dades amb certa seguretat, ja que s'apropen molt a la realitat i estan fundades amb l'estudi del sistema i dades mesurades en igualtat de condicions.

## 2.3 Elecció de les dades d'interès

Ara que la font de vibracions ja s'ha definit i s'han pres totes les mesures oportunes, s'han estudiat, entès i treballat de manera que siguin coherents; el següent pas és definir per quina aplicació es vol dissenyar aquest sistema d'alimentació Harvesting.

Una de les aplicacions que motiven la instal·lació d'un sistema com aquest a una motocicleta, consisteix a mesurar amb un sensor d'infrarojos la temperatura en cada moment dels pneumàtics de la motocicleta. En un principi aquesta sembla una aplicació no gaire necessària i sense importància rellevant, però a qui li agrada sortir a rodar amb la motocicleta i veure curses de Moto-GP, coneixen la importància d'una bona temperatura dels pneumàtics en tot moment, ja

que la goma amb la qual són fabricats, amb la temperatura varia la força de fricció amb l'asfalt, per tant, en condicions inadequades, podria causar un accident. D'igual manera, hi ha moltes més aplicacions que es poden beneficiar d'aquest Energy Harvesting en comptes del sensor de temperatura.

Per tant, per una aplicació com la comentada, en la que es necessita conèixer la informació mesurada per un node sensor en temps real per així adaptar la conducció, es defineixen quatre moments de la conducció en els que els conductors es troben més habitualment:

- Ralentí (1000 rpm): En el moment que es vol començar a circular, s'encén la motocicleta i es deixa escalfar mentre ens preparem. En aquest temps, la motocicleta produeix unes vibracions que el sistema que dissenyarem ja estarà aprofitant per alimentar el node sensor. D'igual manera, cada cop que el trànsit obligui a parar, com per exemple, a un Stop, un semàfor, un pas de vianants, etc., són moments en què la motocicleta estarà a 1000 rpm i alimentarà el node sensor.

- Ciutat (3500 rpm): Amb aquesta motocicleta i amb altres de gran cilindrada, 3500 rpm són les revolucions habituals quan es circula per ciutat, la motocicleta en una marxa superior i menys revolucions s'ofega i amb una marxa inferior i per tant més revolucions, s'estaria conduint de manera agressiva i contraindicada.

- Autopista (5000 rpm): Com al cas anterior, a les motocicletes de gran cilindrada, el més comú és que a una velocitat de 120 km/h el motor treballi al voltant de 5000 rpm si es troba en una marxa adequada (en aquest cas, en la sisena marxa).

- Corbes per muntanya (7000 rpm): Aquest apartat, possiblement és el més discutible, perquè depèn molt del tipus de conducció i experiència de cadascú amb la motocicleta i amb aquest tipus de conducció. S'ha escollit 7000 rpm perquè és perillós revolucionar més la motocicleta a causa de molts factors que no depenen del conductor, es preferible no forçar la motocicleta tant com es podria. Després d'analitzar les acceleracions, frenades, canvis de marxa, etc., pràcticament sempre estaríem passant per 7000 rpm.

## 2.4 Modelització del sistema amb les dades

Ara ja es tenen totes les dades necessàries i s'han definit les freqüències d'interès, a la taula 2.4 es mostra les dades finals amb les quals es treballa per al disseny del Harvester.

R. motor (rpm)	acceleració (m/s <sup>2</sup> )	F. vibracions (Hz)	Velocitat angular (rad)
1000	1,533	36,9	231,85
3500	1,387	109,3	686,75
5000	2,912	160,9	1010,96
7000	4,139	225,0	1413,47

Taula 2.4: Dades finals disseny

Per portar a terme el disseny del recol·lector d'energia, primer de tot, s'ha de plantejar quines possibilitats hi ha i quins components es farien servir. Però abans de tot s'ha de definir què és un cantilever. Es tracta d'una estructura (generalment rectangular) fixada a un extrem i lliure a l'altre, tridimensional, l (llarg), w (ample), t (gruix) que es flexiona estàticament (DC) quan se li aplica una força estàtica a l'extrem, o dinàmica, vibra, (AC) quan la força aplicada és harmònica.

La primera opció de disseny consisteix a adaptar la longitud del cantilever, que pot ser el propi piezo, o un altre component que tingui la longitud necessària per treballar a la freqüència d'interès sobre quin es posaria el piezo a la base perquè aprofiti la flexió i acceleració del cantilever. Per tant, per cada una de les freqüències hi ha un cantilever d'una longitud diferent. Això segons a quina freqüència, per qüestions d'espai, pot no ser el més eficient o directament inimplementable.

En aquest cas, la fórmula que es fa servir per determinar la longitud que ha de tenir el cantilever es calcula amb la següent expressió:

$$Longitud = \sqrt[4]{\frac{E * t^2}{0,24 * 16 * \pi^2 * D * f^2}} \quad (2.1)$$

Definició de les dades:

t: Gruix cantilever

E: Mòdul de Young del material del cantilever

D: Densitat del material del cantilever

f: Freqüència

Altra opció, que és la que es farà servir en aquest treball, és aprofitar el piezo com a cantilever. Si es deixa de la longitud amb la qual es compra, sempre treballarà a la mateixa freqüència. Freqüència que es pot calcular amb la fórmula (2.1) aïllant la "f". Per compensar la longitud necessària, el que es pot fer, és afegir una massa a l'extrem del cantilever de manera que per cada massa que s'afegeix al mateix cantilever, tindrem un disseny que treballa a freqüències

diferents [8]. D'aquesta manera tots quatre cantilevers tindran la mateixa mida i es redueixen els problemes d'espai a l'hora d'implementar el disseny a la motocicleta. Per entendre el perquè d'aquesta massa al cantilever, s'ha de comparar el cantilever amb un sistema massa-molla, com el de la figura 2.9, on hi ha una molla amb una constant "K" que ve determinada per la molla en funció del material i dimensions que la formen i a l'extrem es fica una massa que fa una força que deforma la molla. Amb el cantilever succeeix el mateix, hi ha una constant "k", que depèn de les característiques del cantilever, així com les dimensions i el material, i a l'extrem se li posa una massa que modifica la inèrcia i modifica el funcionament del cantilever quan és sotmès a forces vibracionals.

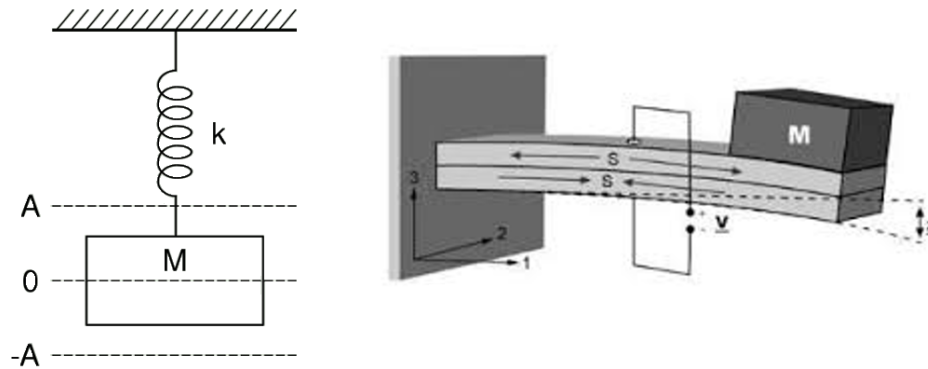


Figura 2.9: Massa-molla i massa-cantilever

La fórmula que es fa servir per al càlcul de la "k" en el cas del cantilever és la següent:

$$k = \frac{E * w * t^3}{4 * l^3} \quad (2.2)$$

Que, com es comentava abans, depèn de les dimensions i material del cantilever, on:

E: Mòdul de Young del material

w: ample

t: gruix

l: longitud

Per al càlcul d'aquesta massa es fa servir la següent fórmula:

$$m = \frac{k}{f^2 * (2 * \pi)^2} \quad (2.3)$$

Aquesta massa que es calcula, és la massa total que ha de tenir el cantilever, per tant, s'ha de tenir en compte que no és la massa que s'ha d'afegir. La massa a afegir, serà la diferència entre aquesta massa i l'efectiva del propi cantilever que es calcula amb les següents fórmules:

$$m_{piezo} = D * t * w * l \quad (2.4)$$

$$m_{ef.piezo} = 0,24 * m_{piezo} = 0,24 * D * t * w * l \quad (2.5)$$

$$m_{afegir} = m - m_{ef.piezo} \quad (2.6)$$

Una interpretació que s'ha de tenir en compte en la fórmula (2.6) és que no es pot afegir una massa negativa. Això s'interpreta com que, per una freqüència determinada, si apliquem la fórmula (2.1) obtindríem una longitud inferior a la que fem servir en el disseny de la fórmula (2.2) que en conseqüència, afecta la fórmula (2.3) que depèn de la “k”. Les possibles solucions per resoldre un cas com aquest es comenten més endavant.

## 2.5 Càlculs de disseny

Ara que ja es compta amb les mesures necessàries i les equacions de disseny s'ha d'escollir quin piezo es farà servir, extreure les dades necessàries del seu Datasheet i fer els càlculs oportuns per finalitzar el disseny teòric que posteriorment es simularà.

El piezoelèctric escollit per aquest projecte té com a referència “FS-2513P”, A la taula 2.5, es mostren les dades extretes del Datasheet necessàries per al disseny.

Variable	valor
E = Modul de Young	3,00E+09 Pa
w = ample	1,30E-02 m
t = gruix	1,00E-04 m
l = longitud	2,50E-02 m
D = Densitat	1880 kg/m <sup>3</sup>
Q	10

Taula 2.5: Datasheet FS-2513P

Després de fer alguns càlculs per les quatre freqüències escollides, per algunes s'observa que la massa total que s'ha de tenir és inferior a la massa efectiva del mateix piezo. Això implica que per aquelles freqüències hem de modificar alguna dada de les que depèn la freqüència de disseny.

Per tal d'augmentar la massa, que es calcula amb la fórmula (2.3), s'ha d'incrementar la “k”, ja que es troba al numerador i la resta de dades no són variables. Per tant, per tal d'augmentar la “k” s'han de mirar les variables de la fórmula (2.2) i veure diferents possibilitats que es destaquen a la taula 2.6 per cada variable, per tal d'incrementar la massa.

modificació variable	implementació	avantatges	desavantatges
Incrementar E	Per tal d'incrementar el mòdul de Young el que es pot fer, és ficar sota el piezo un cantilever d'un altre material amb una "E" més gran.	- Econòmic per incrementar tant com es necessita la massa, només s'ha d'escollir el material adequat.	- Molt bàsic. - S'ocupa més gruix però per la mateixa potència.
Incrementar t	Per tal d'incrementar el gruix del piezo, el que es pot fer és ficar més piezos, un a sobre de l'altre i connectar-los en sèrie o paral·lel segons convingui.	- Com la "t" és cúbica, l'increment es nota molt a la massa - Es guanya potència per cada piezoelèctric que s'afegeix.	- Molt més car.
Incrementar w	Per tal d'incrementar l'ample del piezo, el que es pot fer és ficar més piezos, un al costat de l'altre i connectar-los en sèrie o paral·lel segons ens convingui.	- Es guanya potència.	- Molt espai per un petit increment de la massa.
Decrementar l	Per tal de reduir la longitud, es tenen dues alternatives, tallar el piezo o buscar un altre model que siguin més curts.	- Com la "l" és cúbica, el decrement es nota molt a la massa.	- No és el més adequat modificar el component. - Altre component pot no ser tan bo, canvia el Datasheet.
Combinació variables	Es tenen 4 variables i es poden fer les combinacions de 2, 3 o 4 d'elles per aconseguir l'objectiu desitjat. Concretament hi ha 11 possibles combinacions.	- Es poden fer el disseny que més convingui per cada aplicació.	- Igual que agafa els avantatges de totes les opcions, també els desavantatges.

Taula 2.6: Variables per incrementar la massa

Un cop mostrades les alternatives, si s'analitzen els pros i contres, és pot concloure que incrementar l'ample és el menys efectiu, en canvi fer una combinació de les variables pot ser el millor. Per aquest projecte s'ha decidit ficar més piezos un a sobre de l'altre, de manera que augmenta el gruix, la massa i la potència, però també el cost. A la taula següent es troben els primers càlculs per l'alternativa escollida.

Var.	1piezo	2piezo	3piezo	4piezo	5piezo	6piezo	7piezo	8piezo	9piezo	10piezo
k (kg/s <sup>2</sup> )	0,624	4,992	16,848	39,94	78,00	134,78	214,03	319,49	454,90	624,00
m.p. (kg)	6,11E-05	1,22E-04	1,83E-04	2,44E-04	3,06E-04	3,67E-04	4,28E-04	4,89E-04	5,50E-04	6,11E-04
m.ef.p. (kg)	1,47E-05	2,93E-05	4,40E-05	5,87E-05	7,33E-05	8,80E-05	1,03E-04	1,17E-04	1,32E-04	1,47E-04

Taula 2.7: Càlcul “k” i masses per diferents piezos

A la taula 2.7 es troben amb el càlcul de la constant “k”, fórmula (2.2), per un sistema en el qual poden fer servir d'1 fins a 10 piezos. D'igual manera, hi ha els càlculs de la massa del piezo (m.p.), fórmula (2.4) i de la massa efectiva del piezo (m.ef.p.) fórmula (2.5). Cal destacar que, tal com s'havia comentat, per cada piezo que s'afegeix i per tant incrementem el gruix, la “k” creix molt perquè el gruix està elevat al cub.

Per tant, amb aquestes dades es pot calcular la massa, amb la fórmula (2.3), per a cadascuna de les freqüències d'interès. Tal com es pot apreciar a la taula 2.8:

motor (rpm)	1piezo (kg)	2piezo (kg)	3piezo (kg)	4piezo (kg)	5piezo (kg)	6piezo (kg)	7piezo (kg)	8piezo (kg)	9piezo (kg)	10piezo (kg)
1000	1,16E-05	9,29E-05	3,13E-04	7,43E-04	1,45E-03	2,51E-03	3,98E-03	5,94E-03	8,46E-03	1,16E-02
3500	1,32E-06	1,06E-05	3,57E-05	8,47E-05	1,65E-04	2,86E-04	4,54E-04	6,77E-04	9,65E-04	1,32E-03
5000	6,11E-07	4,88E-06	1,65E-05	3,91E-05	7,63E-05	1,32E-04	2,09E-04	3,13E-04	4,45E-04	6,11E-04
7000	3,12E-07	2,50E-06	8,43E-06	2,00E-05	3,90E-05	6,74E-05	1,07E-04	1,60E-04	2,28E-04	3,12E-04

Taula 2.8: Càlcul massa per l=0,025m



Ara que es té la massa efectiva del cantilever, que el formen els diferents piezos, a la taula 2.7, i la massa total que ha de tenir per cada freqüència, a la taula 2.8, s'ha de comparar quin és el nombre mínim de piezos que s'han de fer servir per cada freqüència. Aquesta comparació és tan senzilla com fer la diferència entre la massa calculada a la taula 2.7 i la massa efectiva de la taula 2.8; si la resta és negativa, per aquell número de piezos no serveix aquest mètode, si és positiva, és implementable. Però es vol anar una mica més enllà. Per un millor funcionament del sistema, no només es vol que la massa sigui més gran, sinó que sigui com a mínim el doble de gran. Per avaluar això en comptes de fer la diferència, es fa el quocient entre les masses, tal com s'aprecia a la taula 2.9.

motor (rpm)	1piezo	2piezo	3piezo	4piezo	5piezo	6piezo	7piezo	8piezo	9piezo	10piezo
1000	0,79	3,17	7,12	12,67	19,79	28,50	38,79	50,66	64,12	79,16
3500	0,09	0,36	0,81	1,44	2,26	3,25	4,42	5,77	7,31	9,02
5000	0,04	0,17	0,37	0,67	1,04	1,50	2,04	2,66	3,37	4,16
7000	0,02	0,09	0,19	0,34	0,53	0,77	1,04	1,36	1,72	2,13

Taula 2.9: Quocient massa (m/m.ef.p.)

D'aquesta manera, si el resultat és inferior a 1, no es pot implementar, són necessaris més piezos; en el cas que el resultat es troba entre 1 i 2, es pot implementar però és susceptible a error; en canvi, a mesura que augmenta el quocient, tenim una millor resposta. A la taula, es marquen amb vermell, taronja i verd els quocients, en funció de la seva validesa.

Després d'analitzar els resultats obtinguts, per tenir un bon funcionament del recol·lector, s'escullen per cada freqüència, la quantitat de piezos que doni el quocient de masses proper a 2. Per tant, a la taula 2.10, es resumeixen les dades finalment extretes de la taula 2.8 i 2.9 per aquest disseny.

revoluciones motor (rpm)	Quocient proper a 2	Nº piezos	Massa (kg)
1000	3,17	2	9,29E-05
3500	2,26	5	1,65E-04
5000	2,26	8	3,13E-04
7000	2,13	10	3,12E-04

Taula 2.10: Piezos per cada freqüència

Per tant, només resta una dada per poder portar aquest disseny a la pràctica. S'ha de saber quina massa s'ha de ficar als extrems dels piezos. Per això s'aplica la fórmula (2.6) a la taula següent:

revoluciones motor (rpm)	m.afegir = m - m.ef.p. (kg)	m.afegir = m - m.ef.p. (g)
1000	6,35E-05	0,0635
3500	9,21E-05	0,0921
5000	1,95E-04	0,195
7000	1,66E-04	0,166

Taula 2.11: Massa per afegir als piezos

Finalment, amb la taula 2.11, es pot concloure aquest disseny, ja que es tenen totes les dades necessàries, així com són les freqüències de disseny en funció de la font de vibracions; les característiques i dimensions del recol·lector d'energia; el tipus d'optimització d'espai i altres recursos; quantitat mínima necessària de piezos per cada freqüència i quantitat finalment escollida; i per últim, la massa que hem d'afegir als piezos per tal que treballin a les freqüències d'interès.

## Capítol 3

# Potència mecànica i elèctrica

En aquest capítol, amb el disseny ja definit, es procedeix a fer les implementacions oportunes al simulador LTSpice per trobar la potència mecànica que es genera a les freqüències d'interès. Amb la potència mecànica ja simulada, es procedirà a implementar els transductors als circuits mecànics per simular la potència elèctrica que es pot extreure per aquest disseny.

### 3.1 Càlcul del model electromecànic

Per analitzar tot el treball de disseny que s'ha fet fins ara, hi ha dues alternatives. Comprar tots els components i fer la implementació a sobre de la motocicleta o en un laboratori on podem simular la font de vibracions i fer el testing oportú. Altra opció és simulant el seu equivalent electromecànic i després fer la transducció de mecànic a elèctric per veure quanta potència pot proporcionar aquest disseny. En aquest apartat, es faran les simulacions oportunes.

Per tal de fer l'equivalent electromecànic hi ha el circuit RLC de la figura 3.1 estudiat a [24], alimentat per una font de tensió, que amb el seu anàlisi en freqüència, s'obté la resposta mecànica d'aquest disseny, per tant, el valor en volts que s'obté a les simulacions no és una tensió, sinó un equivalent del moviment mecànic que patirà el cantilever format pel piezo i la massa quan està sotmès a la força vibracional de la motocicleta:

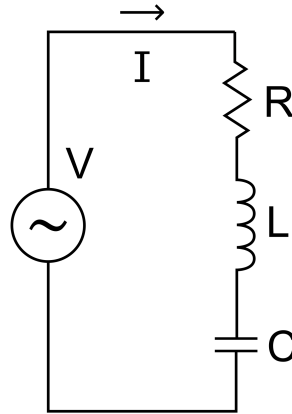


Figura 3.1: Circuit equivalent electromecànic RLC del cantilever

Els valors dels components de la figura 3.1, vénen determinats per les següents fórmules que fan que aquest circuit teòric tingui una resposta molt similar a la implementació dels piezos sobre la font de vibracions.

$$\text{Resistència} : R = \text{Velocitat angular} * m/Q \quad (3.1)$$

$$\text{Bobina} : L = m \quad (3.2)$$

$$\text{Condensador} : C = 1/k \quad (3.3)$$

$$\text{Font de tensió} : V_f = m * \text{acceleració} \quad (3.4)$$

Amb les fórmules que s'acaben de veure, es pot justificar el comportament electromecànic del cantilever, on:

- La R simula la resistència mecànica del cantilever.
- La L simula la massa mecànica del model massa-molla.
- La C simula la “k” (constant, acoblament mecànic) del model massa-molla.
- La  $V_f$  simula la força vibracional que se li aplica al sistema.

Per fer els càlculs del model electromecànic s'extrau les dades de les següents taules:

Velocitat angular, taula 2.4

acceleració, taula 2.4

m, taula 2.10

Q, taula 2.5

k, taula 2.7

A la taula següent es concentren els valors per tots els components per les quatre freqüències de disseny.

revolucions (rpm)	Freq. (Hz)	R ( $\Omega$ )	L (H)	C (F)	Vf (V)
1000	36,9	2,15E-03	9,29E-05	2,00E-01	1,42E-04
3500	109,3	1,14E-02	1,65E-04	1,28E-02	2,29E-04
5000	160,9	3,16E-02	3,13E-04	3,13E-03	9,10E-04
7000	225,0	4,41E-02	3,12E-04	1,60E-03	1,29E-03

Taula 3.1: Valors RLC

Les dades de la taula 3.1, s'introdueixen al simulador "LTSpice" en quatre circuits RLC diferenciats i es simulen per veure el seu comportament i comprovar que el disseny és correcte i cadascun dels quatre circuits treballen a les quatre freqüències de disseny.

Abans de procedir amb les simulacions, cal aclarir que els valors de la taula 3.1, ja contemplen per a cada cas el número de piezos que es fan servir, ja que els components depenen de la massa "m" i de la constant "k" que s'han calculat amb els valors del disseny com si tots els piezos junts fossin un, indiferentment de si després la connexió es fa en sèrie o en paral·lel. Per tant, mecànicament es comporten com un sol cantilever i el seu model electromecànic té els valors calculats a la taula, sense haver de fer diferents circuits RLC i posteriorment fer el connexionat corresponent.

## 3.2 Simulacions del model electromecànic

Un cop calculat el model electromecànic, es procedeix a implementar els circuits al simulador "LTSpice" i observar els resultats d'aquestes simulacions. S'ha de tenir en compte que els circuits que s'implementaran al simulador, amb els components ja calculats, són només un model teòric per poder simular el comportament del nostre disseny, per tant aquests circuits fora d'un simulador no es fan servir i són pràcticament in-implementables degut als valors poc comuns dels seus components.

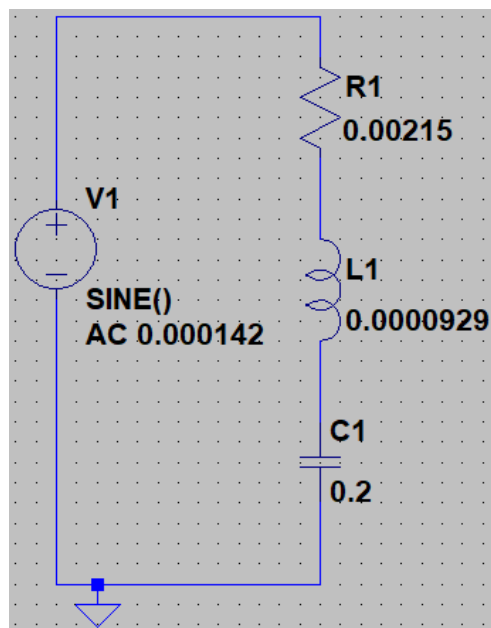


Figura 3.2: RLC mecànic 1000 rpm

A la figura 3.2 es troba el model electromecànic que simula el comportament del cantilever dissenyat per a 1000 rpm equivalent a 36,9 Hz.

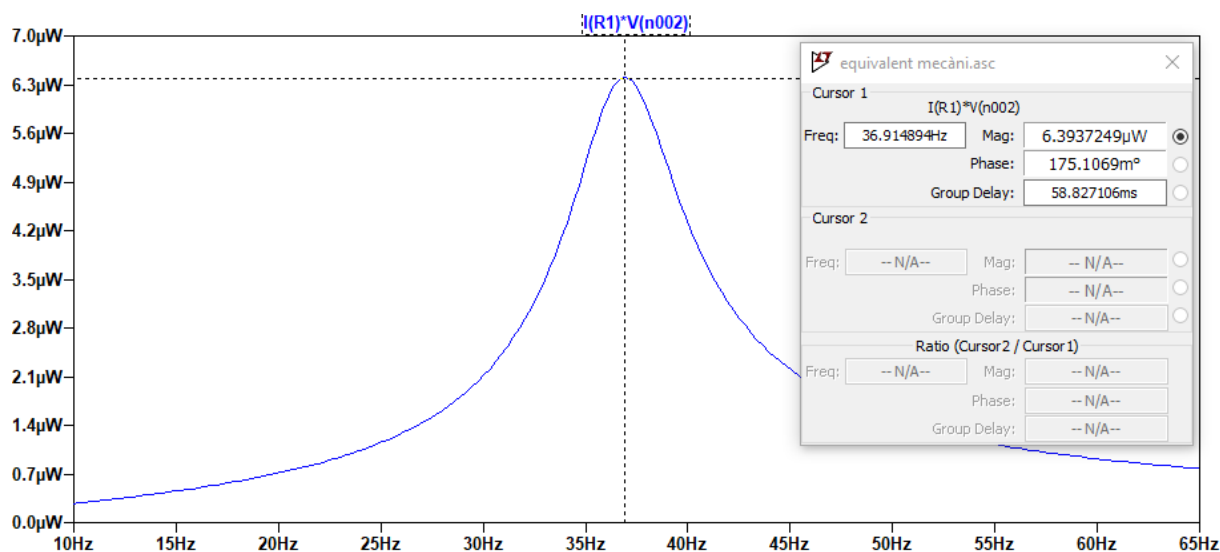


Figura 3.3: Resposta freqüencial de la potència mecànica a 1000 rpm

A la figura 3.3 es mostra el resultat de la simulació del model electromecànic per 1000 rpm, on el que és d'interès és mirar la potència mecànica, de la que s'extraurà potència elèctrica amb un transductor. En aquest cas, es veu que treballa pràcticament a la freqüència de disseny de 36,9 Hz i s'obté una potència de 6,39 uW.

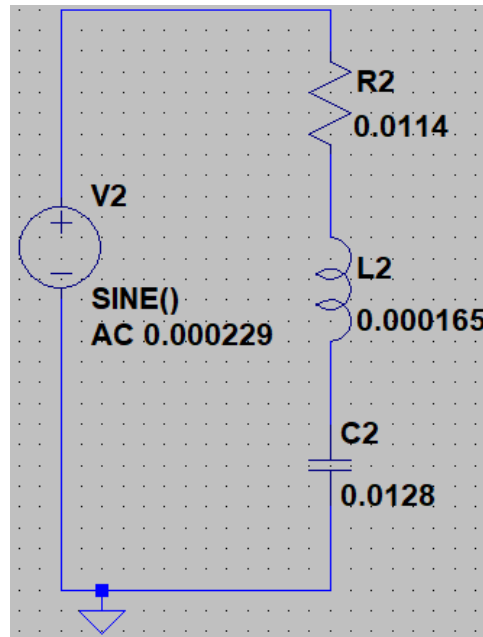


Figura 3.4: RLC mecànic 3500 rpm

A la figura 3.4 es troba el model electromecànic que simula el comportament del cantilever dissenyat per a 3500 rpm equivalent a 109,3 Hz.

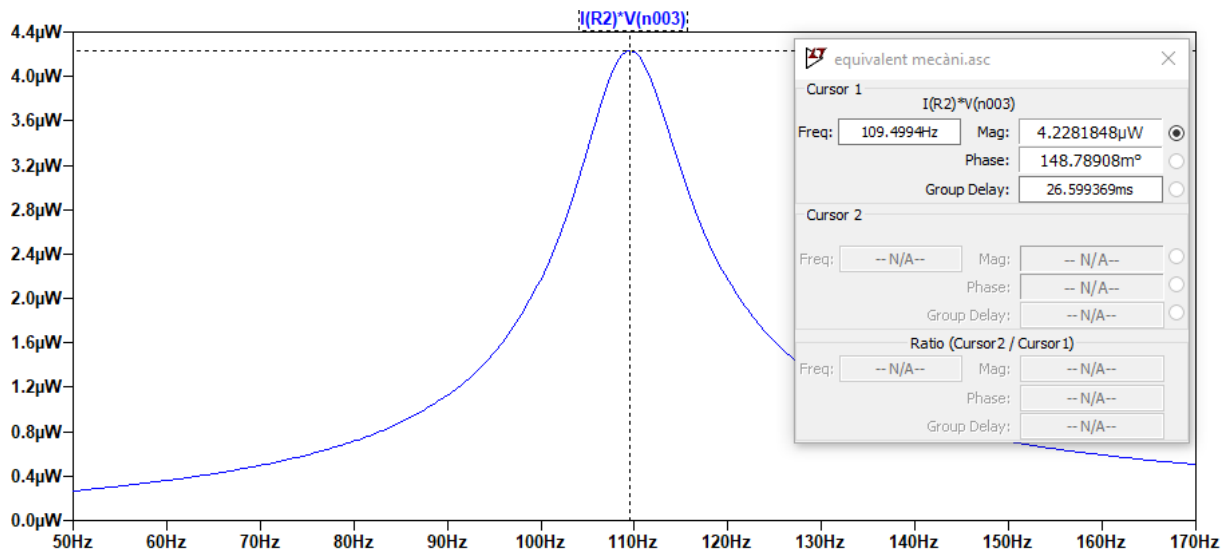


Figura 3.5: Resposta freqüencial de la potència mecànica a 3500 rpm

A la figura 3.5 es mostra el resultat de la simulació del model electromecànic per 3500 rpm. En aquest cas, es veu que treballa pràcticament a la freqüència de disseny de 109,3 Hz i s'obté una potència de 4,23 uW.

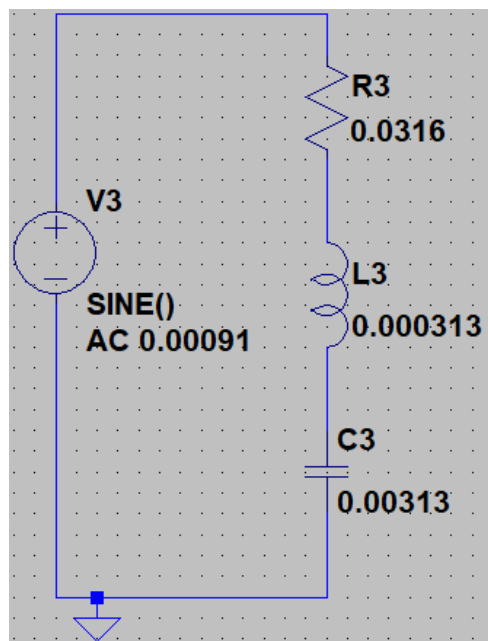


Figura 3.6: RLC mecànic 5000 rpm

A la figura 3.6 es troba el model electromecànic que simula el comportament del cantilever dissenyat per a 5000 rpm equivalent a 160,9 Hz.

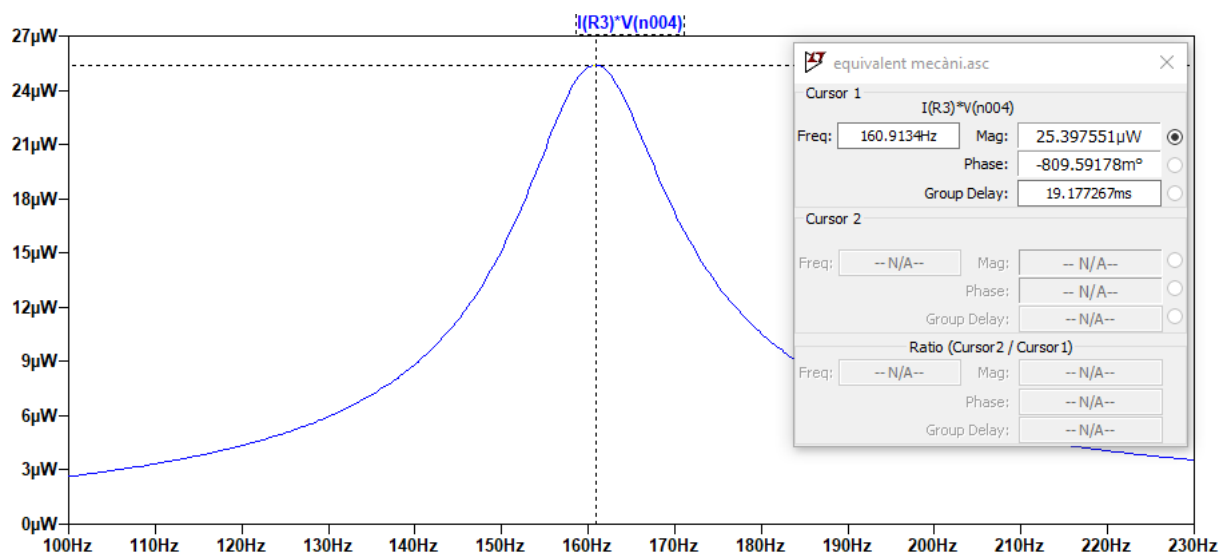


Figura 3.7: Resposta freqüencial de la potència mecànica a 5000 rpm

A la figura 3.7 es mostra el resultat de la simulació del model electromecànic per 5000 rpm. En aquest cas, es veu que treballa pràcticament a la freqüència de disseny de 160,9 Hz i s'obté una potència de 25,40 μW.



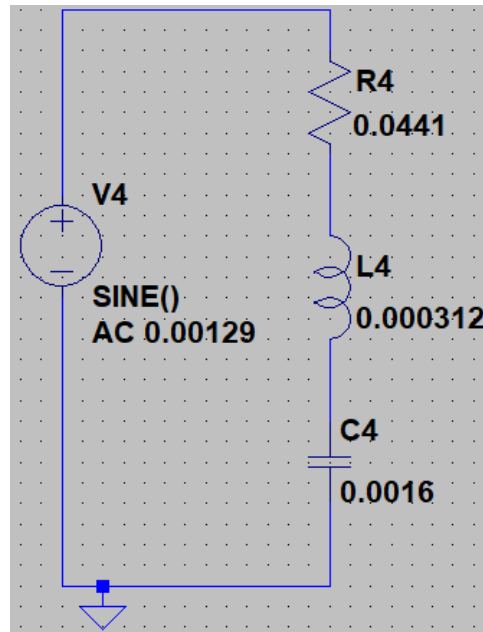


Figura 3.8: RLC mecànic 7000 rpm

A la figura 3.8 es troba el model electromecànic que simula el comportament del cantilever dissenyat per a 7000 rpm equivalent a 225,0 Hz.

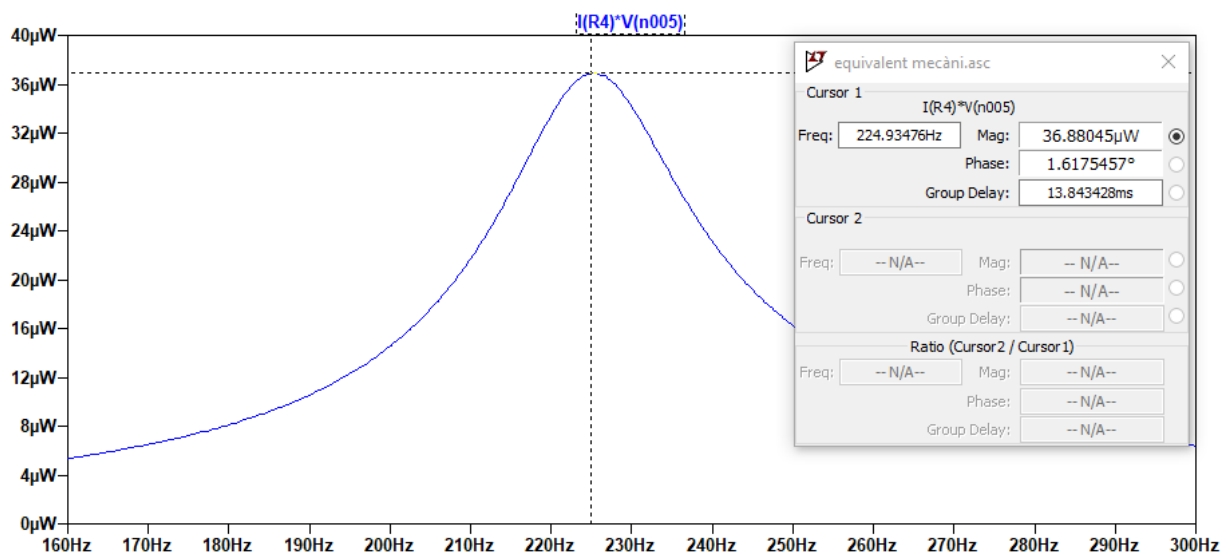


Figura 3.9: Resposta freqüencial de la potència mecànica a 7000 rpm

A la figura 3.9 es mostra el resultat de la simulació del model electromecànic per 7000 rpm. En aquest cas, es veu que treballa pràcticament a la freqüència de disseny de 225,0Hz i s'obté una potència de 36,88μW.

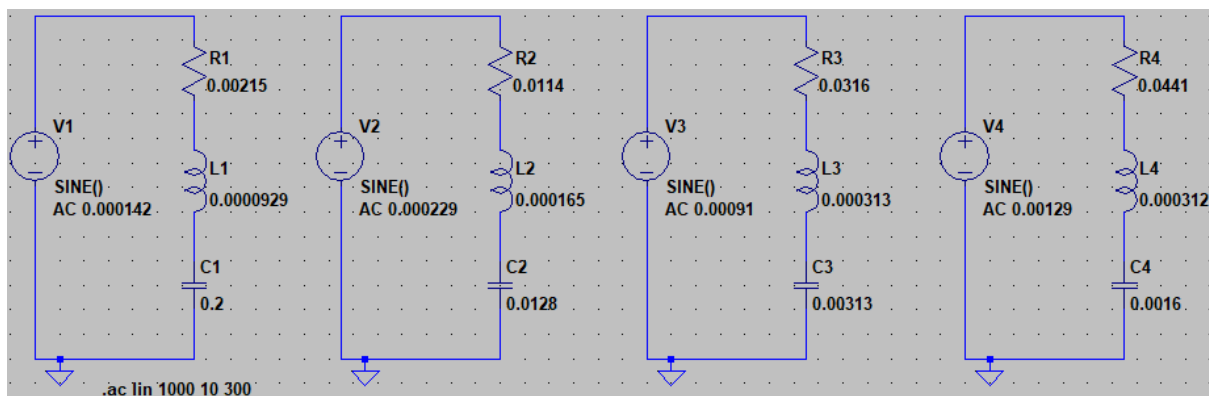


Figura 3.10: RLCs mecànics de tot el disseny

A la figura 3.10 es troben tots els models electromecànics junts, que simulen el comportament dels cantilevers dissenyats.

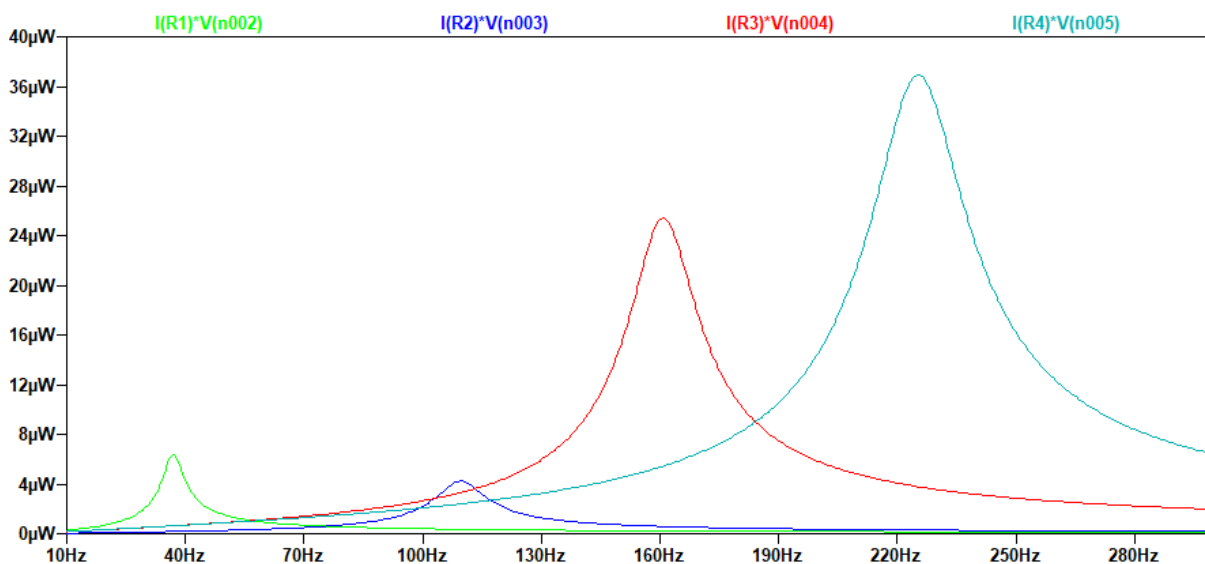


Figura 3.11: Resposta freqüencial de la potència mecànica a tot el disseny

A la figura 3.11 es mostra el resultat de la simulació de tots els models electromecànics, on es veu la potència mecànica per cada disseny a totes les freqüències. Que, com ja s'ha vist cas per cas, les potències obtingudes a les freqüències de disseny, són les de la taula 3.2:

revolucions motor (rpm)	Freqüència (Hz)	Potència mecànica (uW)
1000	36,9	6,39
3500	109,3	4,23
5000	160,9	25,40
7000	225,0	36,88

Taula 3.2: Potència mecànica

### 3.3 Càlcul del model de transducció

Ara que ja es tenen els models mecànics per les quatre freqüències del nostre disseny s'ha de fer la transducció mecànico-elèctrica per així finalment poder representar la potència que pot subministrar aquest disseny per cada freqüència d'interès. Per tal de modelitzar el transformador que es veurà a les pròximes simulacions, s'estudia i fa servir el model explicat a l'assignatura d'Aplicacions Multidisciplinàries [24], que consisteix a afegir al model RLC mecànic fins ara vist, una bobina considerablement més petita que la que teníem per no afectar gaire la freqüència de disseny, que farà el paper de bobina primària d'un transformador, acompanyat d'una capacitat, que faran la transducció d'energia mecànica a energia elèctrica.

En aquest apartat es calculen el valor dels components de la figura 3.12. Les dues bobines que formen el transformador, el primari ( $L_1$ ) i el/s secundari/s ( $L_2$ ), així com la resistència de càrrega per cada cas. El valor de la capacitat ( $C$ ), l'extraiem del Datasheet.

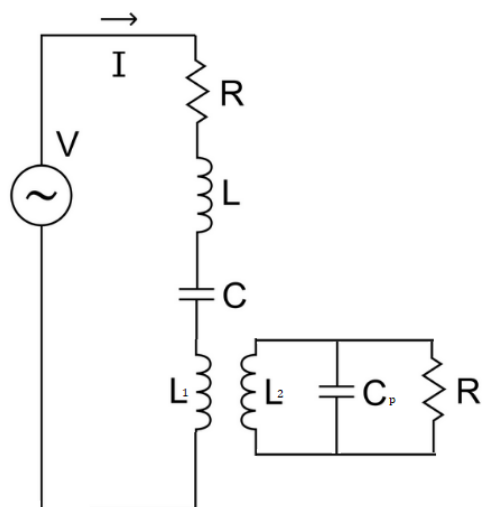


Figura 3.12: Circuit transducció mecànico-elèctrica

Del Datasheet del piezo s'extrau que la capacitat del model del piezo ( $C_p$ ) en tots els casos serà de 1,5nF.

Pel que fa al valor del primari ( $L1$ ), per no afectar gaire al sistema i obtenir una resposta en el rang freqüencial desitjat, i tenint-lo en compte com una força de fricció que afecta lleugerament al circuit, es farà:

$$L1 = L/10 \quad (3.5)$$

Per calcular el valor dels secundaris ( $L2$ ), primer de tot hem calculem la relació que hi ha entre el primari i el secundari, i això s'aconsegueix amb l'anomenat factor de transferència ( $FT$ ), que s'aconsegueix amb la següent fórmula, extreta de [24]:

$$FT = e31 * A_p * \frac{3}{2} * \frac{t}{l^2} \quad (3.6)$$

On tenim:

$e31$  constant del piezo de valor 0,06 C/m<sup>2</sup>

$A_p$  Àrea del piezo =  $w * l = 0,013 * 0,025 = 0,000325$  m<sup>2</sup>

$t$  gruix del piezo [m]

$l$  longitud del piezo [m]

Amb el primari i el factor de transferència calculats, ja es poden obtenir els valors dels secundaris, que en cada freqüència, tots els secundaris tindran el mateix valor, només variarà el seu valor amb el canvi de freqüència, ja que depenen del primari, que és diferent per cada freqüència. Respecte a la relació entre el primari i secundari se sap que:

$$FT = \frac{I1}{I2} = \frac{V1}{V2} = \frac{N1}{N2} = \frac{\sqrt{L1}}{\sqrt{L2}} \quad (3.7)$$

Per tant, per obtenir  $L2$ , de l'equació anterior, s'obté:

$$L2 = \frac{L1}{FT^2} \quad (3.8)$$

Amb totes aquestes dades, fixant-nos en la figura 25, només resta obtenir els valors de les diferents impedàncies de càrrega ( $R_l$ ), que es calculen amb la capacitat del piezo ( $C_p$ ) de la següent manera:

$$R_l = Z(C_p) = \frac{1}{\omega * C_p} \quad (3.9)$$

Com el disseny porta diferents números de piezos, s'hauran de connectar en paral·lel, figura 3.13, o en sèrie, figura 3.14, però això variarà el valor de la  $R_l$  com que hi ha varies capacitats en sèrie o paral·lel de les que depèn aquesta impedància. Com es pot apreciar a les figures esmentades, es troba repetit el circuit RLC mecànic per cada piezo que portarà el disseny, això

es deu al fet que cada piezo extraurà energia del mateix circuit mecànic, que comparteixen i formen conjuntament.

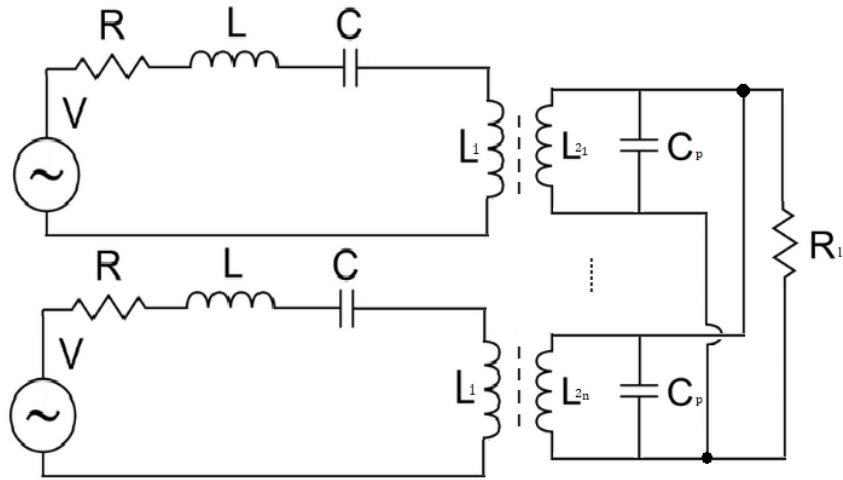


Figura 3.13: Circuit transducció mecànic-elèctric connexió paral·lel

Per calcular la  $R_l$  quan hi ha dos o més piezos en paral·lel, el que es fa és el següent:

$$C_{ptotal} = C_{p1} + C_{p2} + \dots + C_{pn} \quad (3.10)$$

I apliquem la fórmula (3.9) però amb aquesta nova capacitat.

$$R_{lp} = Z(C_p) = \frac{1}{V_{angular} * C_{ptotal}} \quad (3.11)$$

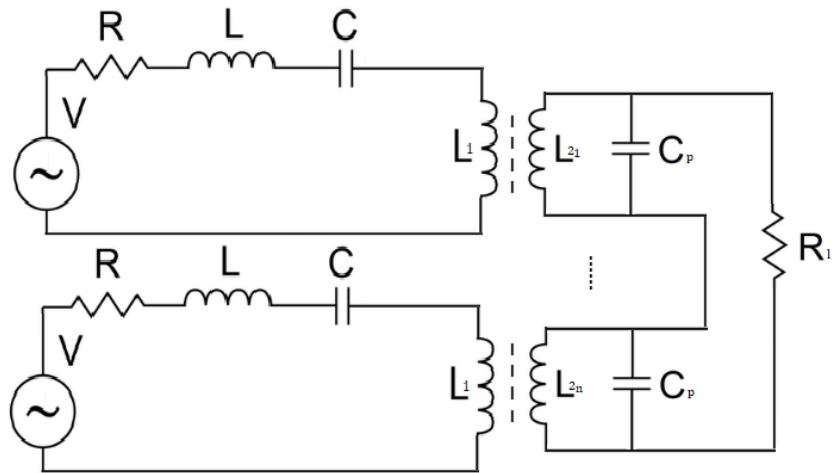


Figura 3.14: Circuit transducció mecànic-elèctric connexió sèrie

Per calcular la  $R_l$  quan hi ha dos o més piezos en sèrie, el primer que es fa és calcular la

capacitat total:

$$\frac{1}{C_{ptotal}} = \frac{1}{C_{p1}} + \frac{1}{C_{p2}} + \dots + \frac{1}{C_{pn}} \quad (3.12)$$

Per tant:

$$C_{ptotal} = \frac{1}{\frac{1}{C_{p1}} + \frac{1}{C_{p2}} + \dots + \frac{1}{C_{pn}}} \quad (3.13)$$

I finalment s'aplica la fórmula (3.11) però amb aquesta nova capacitat.

$$Rls = Z(Cp) = \frac{1}{V_{angular} * C_{ptotal}} \quad (3.14)$$

Seguidament, es procedeix a calcular els components per a tot el disseny per així poder implementar el circuit teòric de la transducció mecànico-elèctrica a l'apartat següent.

Per validar els càlculs dels components fins ara comentats, primer de tot s'analitzaran els resultats per al disseny amb un sol piezo a 1000 rpm. Mirant a la taula 2.9, aquest circuit seria in-implementable ja que s'ha d'afegir una massa negativa, però com és en un cas teòric, per fer proves es pot fer servir aquesta dada. Per això es calcula el circuit de l'equivalent mecànic RLC per 1000 rpm que correspon a una freqüència de 36,9Hz, tal com es mostra a la taula 3.3.

revoluciones (rpm)	Freq. (Hz)	R (Ω)	L (H)	C (F)	Vf (V)
1000(1pz.)	36,9	2,69E-04	1,15E-05	1,60E00	1,78E-05

Taula 3.3: Valors RLC 36,9Hz amb un piezo

A continuació, a la taula 3.4, es procedeix a calcular tots els valors per als components necessaris en la transducció mecànico-elèctrica. Sabent que en tot cas les capacitats són de 1,5nF.

Freq. (Hz)	FT	L1 (H)	L2 (H)	C p. (F)	Rl p. (MΩ)	C s. (F)	Rl s. (MΩ)
36,9(1 pz.)	4,68E-06	1,16E-06	52962,23	1,5	2,875428	1,5	2,875428
36,9	9,36E-06	9,29E-06	106038,6	3	1,437714	0,75	5,750856
109,3	2,34E-05	1,65E-05	30133,68	7,5	0,194150	0,3	4,853764
160,9	3,74E-05	3,13E-05	22329,17	12	0,082429	0,15647	5,605208
225,0	4,68E-05	3,12E-05	14245,01	15	0,047157	0,15	4,715702

Taula 3.4: Valors transformador mecànico-elèctric

### 3.4 Simulacions del model de transducció

Amb els valors dels components que formen el circuit per la transducció ja calculats, es procedeix a fer les primeres proves amb un circuit senzill, que només fa servir un piezo. Per tant, amb la intenció de fer un primer contacte amb la transducció d'energia, s'implementa el circuit de la figura següent, corresponent al disseny per a una freqüència de 36,9 Hz amb un sol piezo.

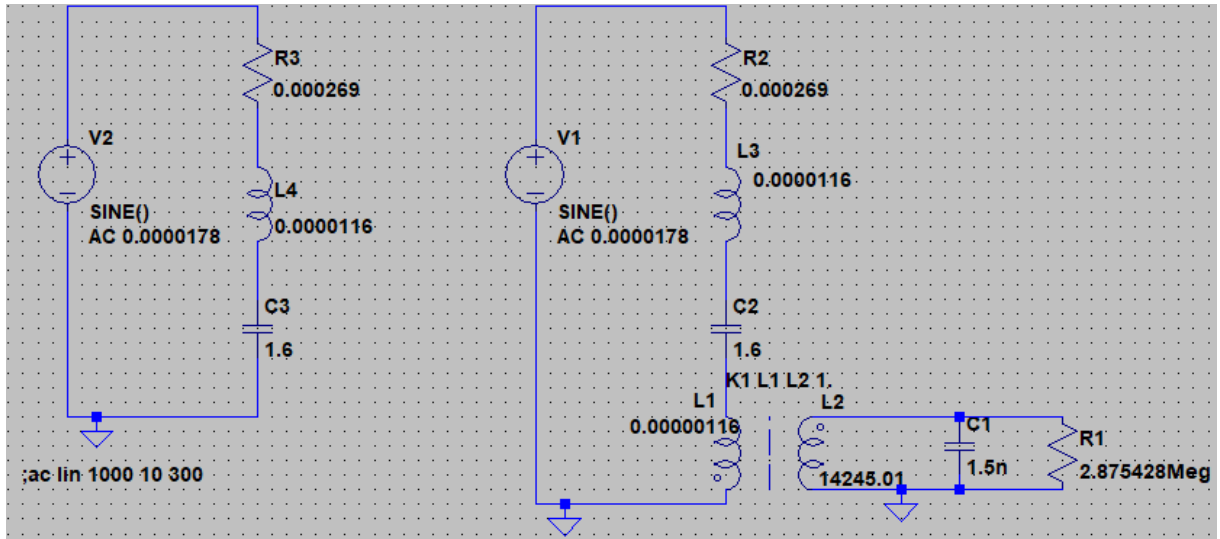


Figura 3.15: Transducció mecanico-elèctrica a 36,9 Hz amb 1 piezo

Per tal de simular la potència elèctrica del circuit de la figura 3.15, hi ha dues opcions, ambdues provinents de la següent fórmula:

$$P = V * I \quad (3.15)$$

I tenint en compte que:

$$V = I * R \quad (3.16)$$

I per tant:

$$I = \frac{V}{R} \quad (3.17)$$

Amb les fórmules (3.15) i (3.16) s'obté que:

$$P = \frac{I^2}{R} \quad (3.18)$$

I amb les fórmules (3.15) i (3.17) s'obté que:

$$P = \frac{V^2}{R} \quad (3.19)$$

A la figura 3.16, es simula la potència amb la fórmula (3.18) i s'obté una potència de 32,43nW. Tenint amb color blau la potència mecànica i amb

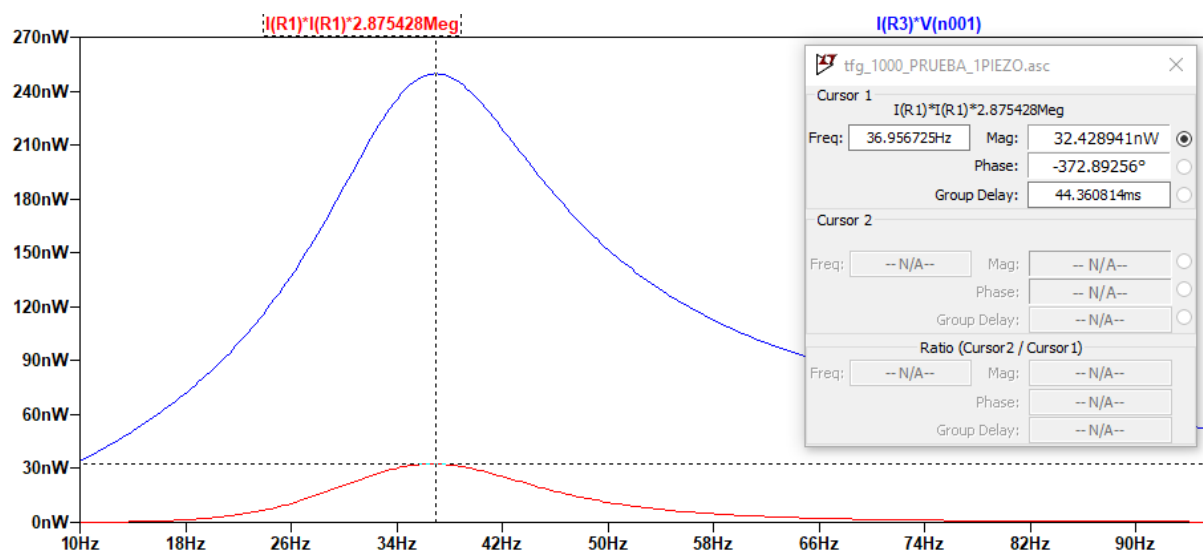


Figura 3.16: Potència obtinguda amb un piezo a 36,9 Hz calculada amb I

En canvi, a la figura 3.17, es simula la potència amb la fórmula (3.19) i s'obté exactament la mateixa potència, tenint amb color blau la potència mecànica i amb color verd la potència elèctrica, per tant, és indiferent quin mètode es fa servir, ja que ambdós són equivalents com la teoria ja indica.

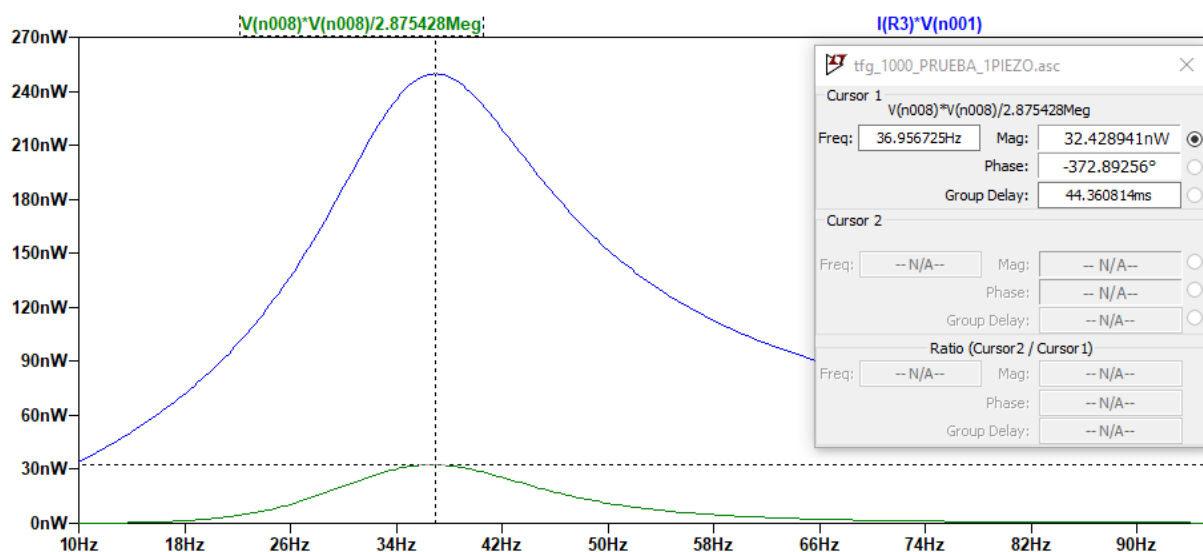


Figura 3.17: Potència obtinguda amb un piezo a 36,9 Hz calculada amb V

A continuació per assegurar-nos que la impedància de càrrega “R load” s’ha calculat correctament i és la més eficient, es fa un escombrat d’aquesta resistència des d’1 MΩ fins a 5MΩ amb salts de 0,5MΩ del circuit de la figura 3.18 amb el comandament “.step param R 1Meg 5Meg 0,5Meg”, on es posa com a valor la variable “R” a la impedància de càrrega.



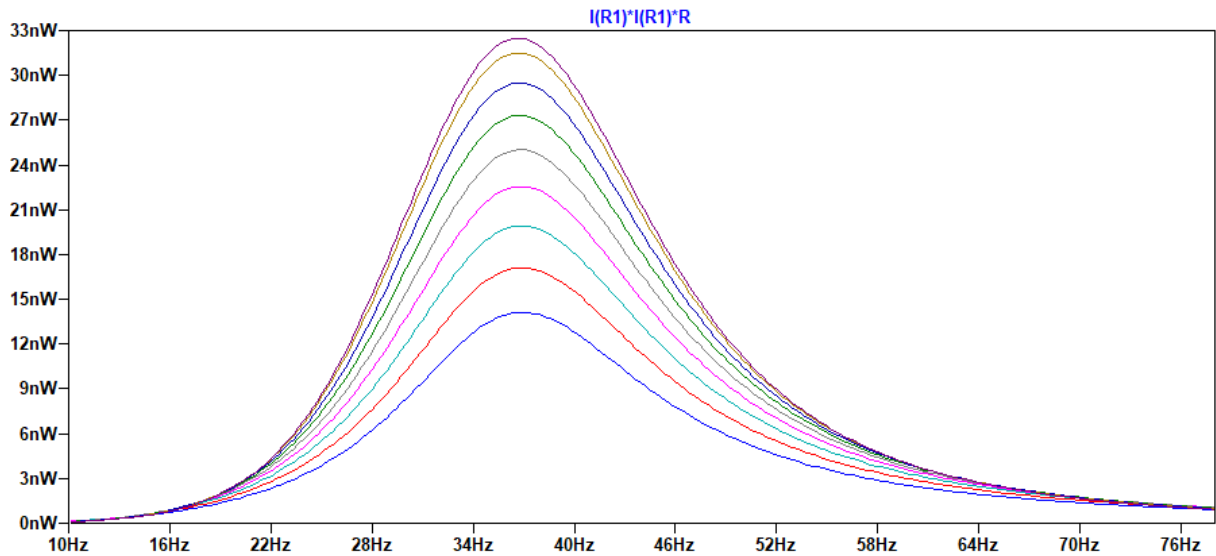


Figura 3.18: Escombrat amb la impedància de càrrega

Com es pot observar a la gràfica 3.18, estan superposades totes les simulacions per tots els valors de la impedància de càrrega “R load” que s’ha simulat. A continuació, per trobar tots els valors d’aquesta figura, es simula el circuit individualment per cadascun d’aquests valors de la impedància d’entrada i es representen a la taula 3.5.

R load (MΩ)	Potència (nW)
1	14,12
1,5	17,06
2	19,83
2,5	29,40
2,875428	32,43
3	32,26
3,5	31,42
4	27,76
4,5	24,96
5	22,36

Taula 3.5: Potència en funció de la impedància de càrrega

Finalment, a la gràfica 3.19 es representen les potències, mostrades a la taula anterior, en funció de la impedància de càrrega “R load”, per observar la impedància òptima i si correspon

amb la calculada teòricament.

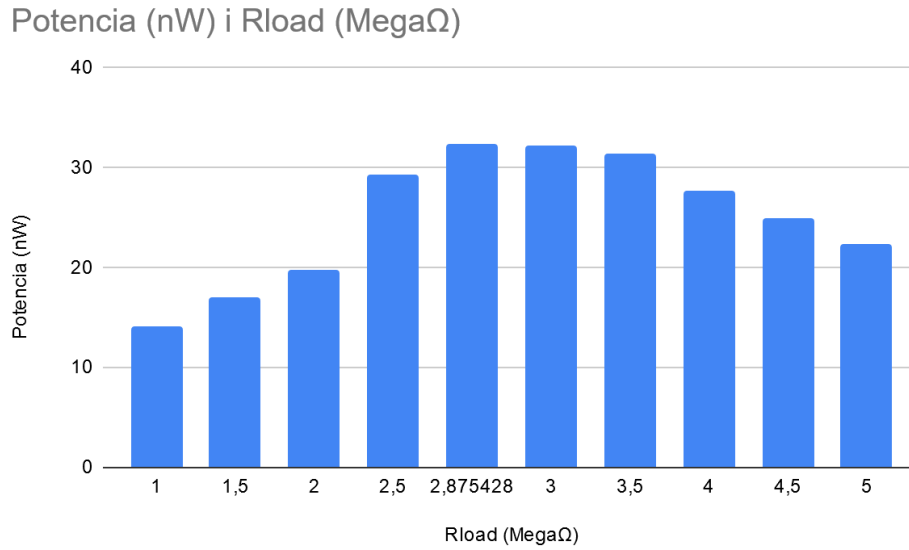


Figura 3.19: Potència en funció de la impedància de càrrega a 36,9Hz amb 1 piezo

Amb aquesta gràfica es poden extreure dues conclusions importants. La primera és que la impedància de càrrega s'està calculant de manera correcta. La segona és que si ens fixem a com es doblega la corba, si s'ha d'introduir un error a la impedància de càrrega, millor que sigui per excés, ja que la variació de la potència respecte de l'òptima és menor.

Amb aquestes primeres simulacions, es pot procedir a fer les simulacions del disseny que comprenen més piezos i es pot analitzar el seu comportament i les possibles connexions. Al circuit de la figura 3.20, es troba la implementació del transductor mecanico-elèctric per una freqüència de 36,9 Hz (corresponent a 1000 rpm) amb dos piezos connectats en sèrie.

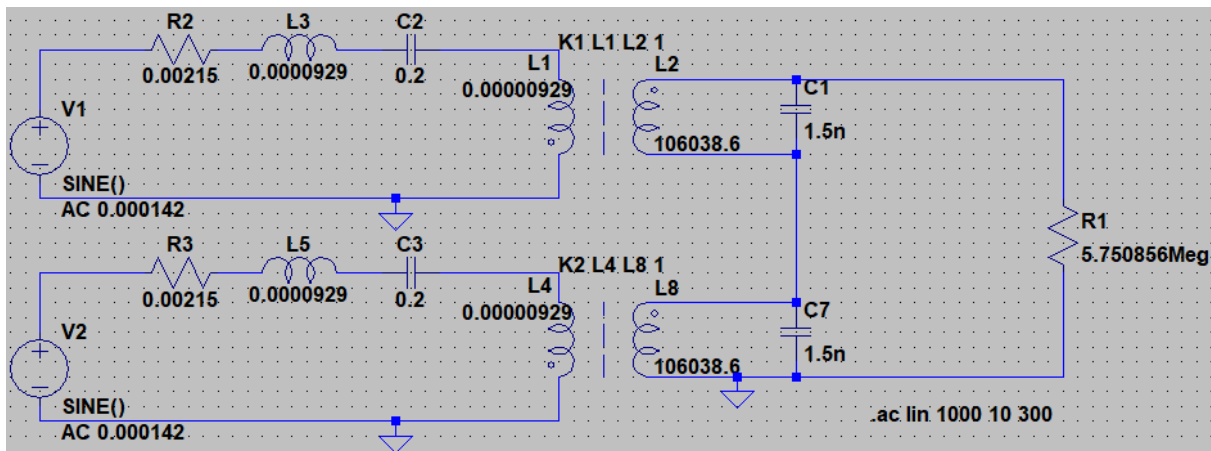


Figura 3.20: Transducció mecanico-elèctrica a 36,9 Hz amb 2 piezos en sèrie

Com a resultat d'aquesta simulació, figura 3.21, s'obté una potència transduïda de 0,525 uW que equival a la potència teòrica que haurien de treure els dos piezos connectats en sèrie del sistema vibracional que s'ha descrit i modelitzat.

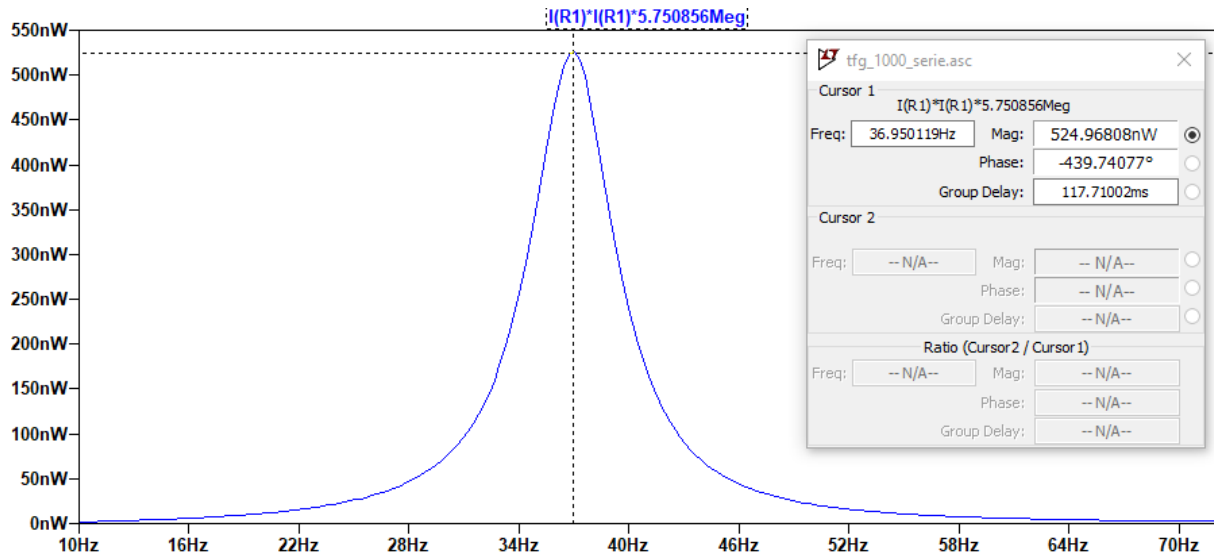


Figura 3.21: Potència transduïda a 36,9 Hz amb 2 piezos en sèrie

Al circuit de la figura 3.22, es troba la implementació del transductor mecanico-elèctric per una freqüència de 36,9 Hz (corresponent a 1000 rpm) amb dos piezos connectats en paral·lel.

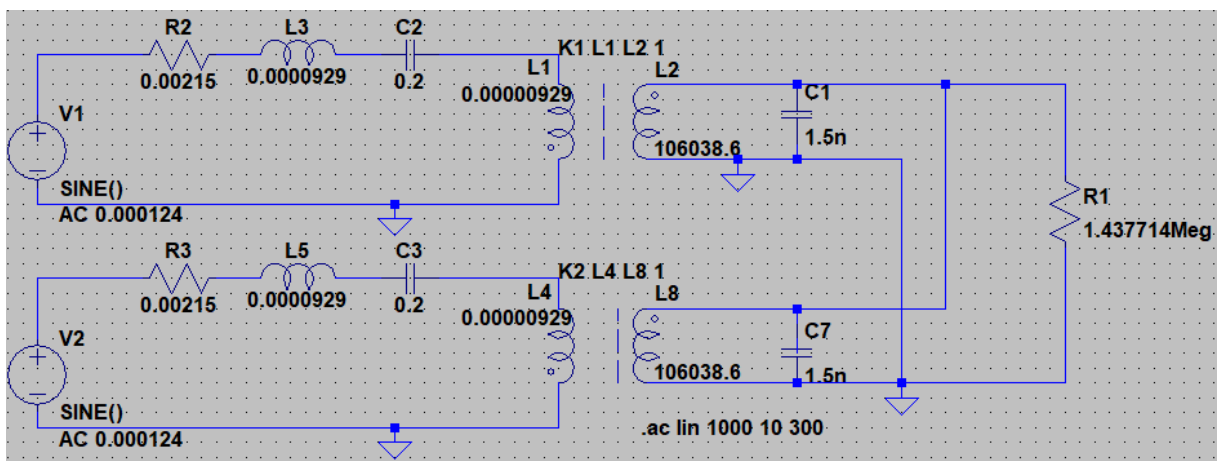


Figura 3.22: Transducció mecanico-elèctrica a 36,9 Hz amb 2 piezos en paral·lel

Com a resultat d'aquesta simulació, figura 3.23, s'obté una potència transduïda de 0,525 uW que equival a la potència teòrica que haurien de treure els dos piezos connectats en paral·lel del sistema vibracional que s'ha descrit i modelitzat.

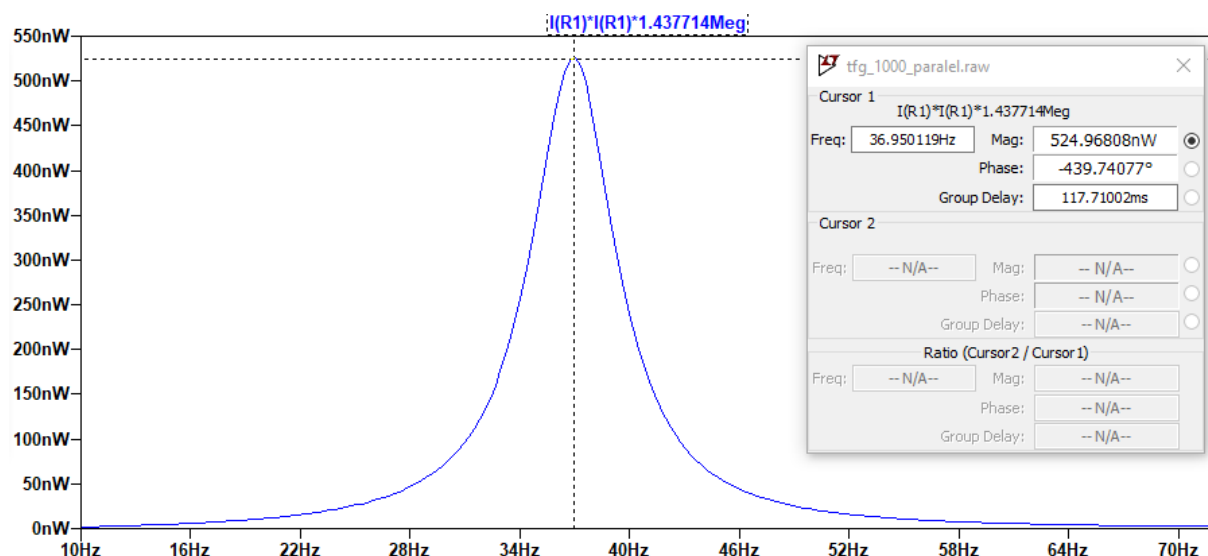


Figura 3.23: Potència transduïda a 36,9 Hz amb 2 piezos en paral·lel

Com es pot concloure amb la taula 3.4 i les figures 3.21 i 3.23, per a un mateix circuit mecànic amb el mateix número de piezos, indiferentment de la connexió final, els resultats seran els mateixos. L'única variable que canvia en funció de la connexió és la impedància de càrrega, que com es pot apreciar a la taula 3.4, per les quatre freqüències, en sèrie és quan més s'assemblen, per tant, continuarem el disseny amb la connexió sèrie.

Al circuit de la figura 3.24, es troba la implementació del transductor mecànic-elèctric per una freqüència de 109,3 Hz (corresponent a 3500 rpm) amb cinc piezos connectats en sèrie.

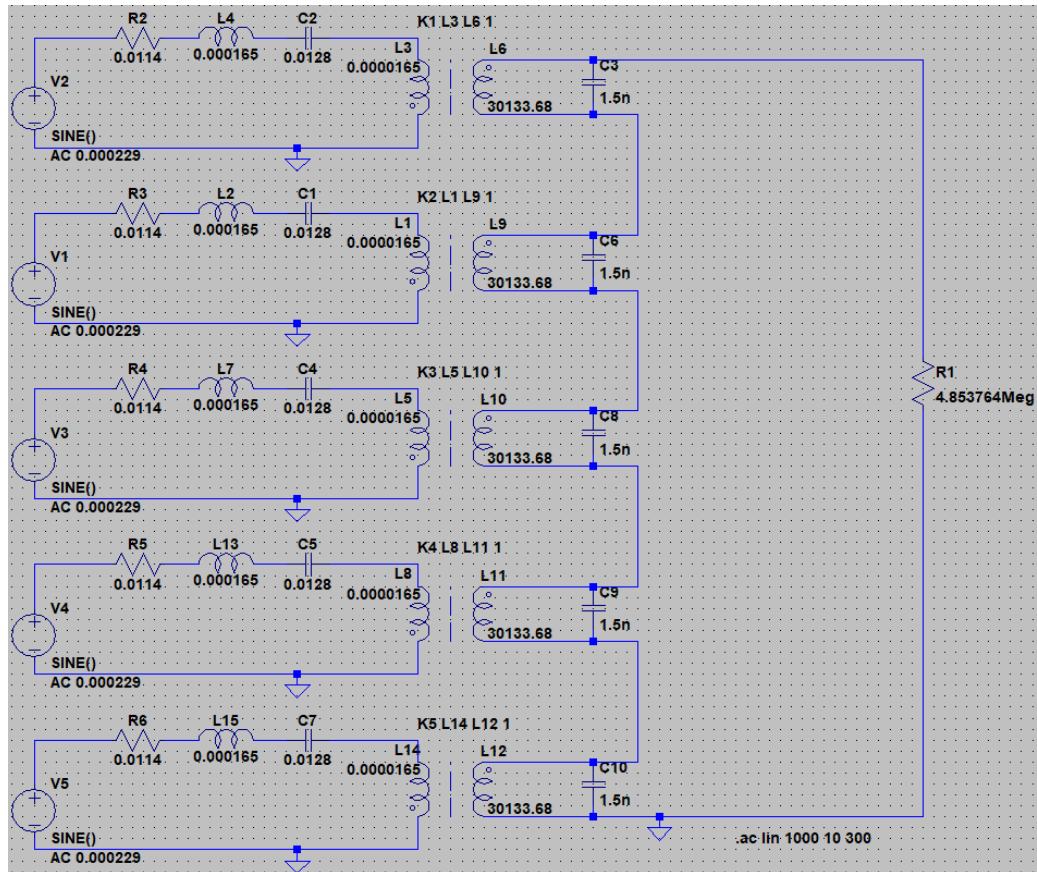


Figura 3.24: Transducció mecánico-elèctrica a 109,3 Hz amb 5 piezos en sèrie

Com a resultat d'aquesta simulació, figura 3.25, s'obté una potència transduïda de 0,453 uW que equival a la potència teòrica que haurien de treure els dos piezos connectats en sèrie del sistema vibracional que s'ha descrit i modelitzat.

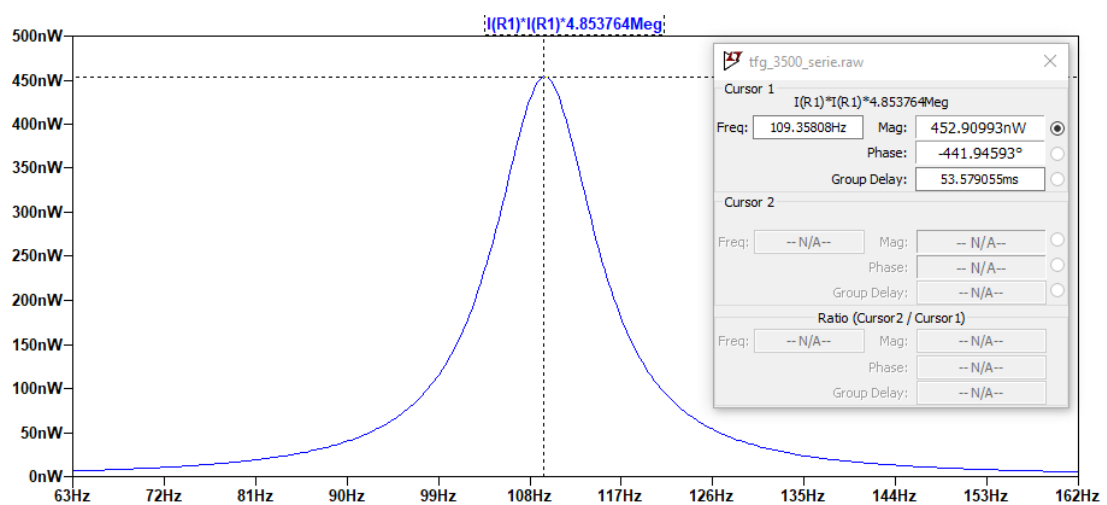


Figura 3.25: Potència transduïda a 109,3 Hz amb 5 piezos en sèrie

Al circuit de la figura 3.26, es troba la implementació del transductor mecánico-elèctric per una freqüència de 160,9 Hz (corresponent a 5000 rpm) amb vuit piezos connectats en sèrie.

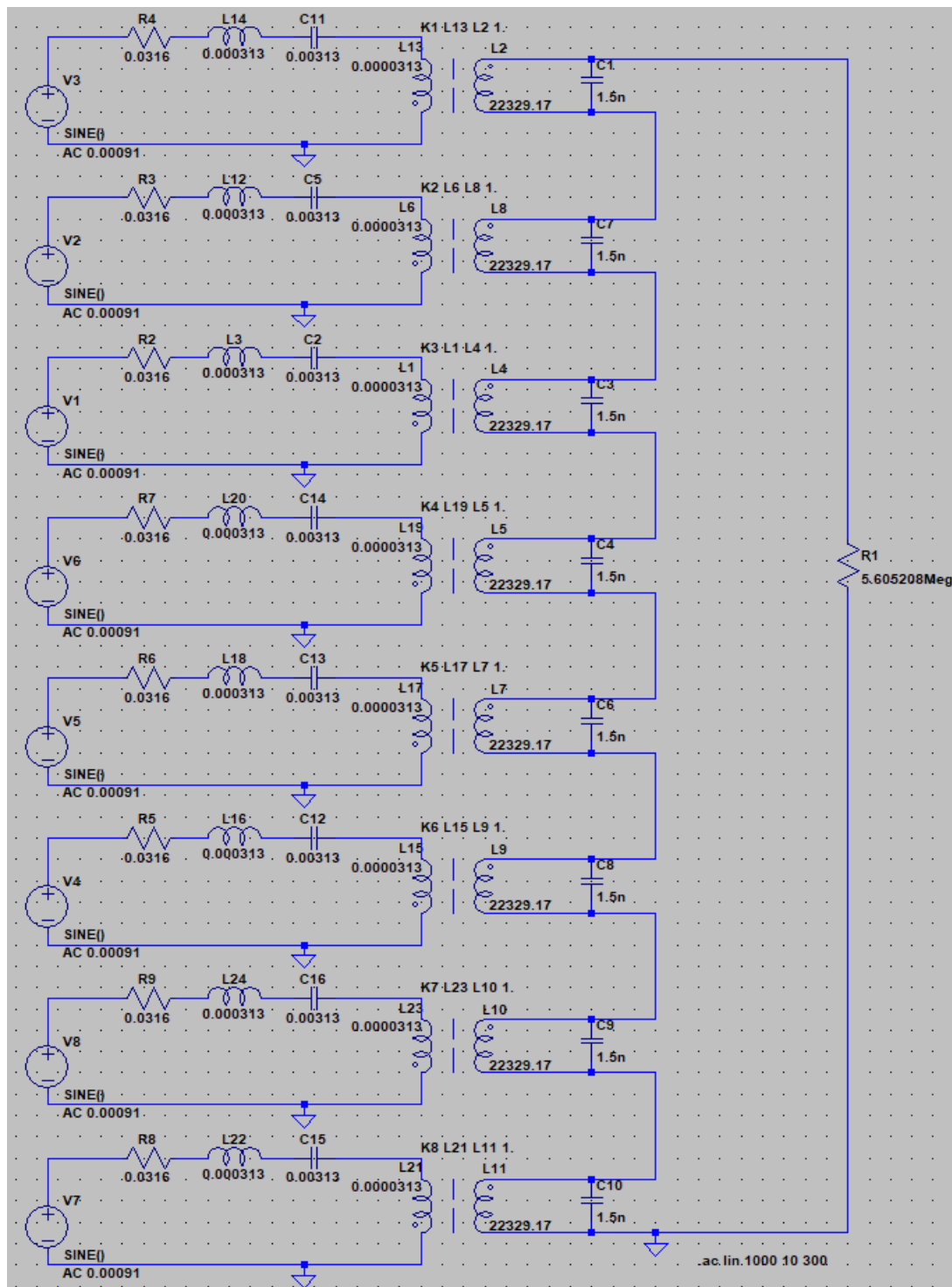


Figura 3.26: Transducció mecánico-elèctrica a 160,9 Hz amb 8 piezos en sèrie

Com a resultat d'aquesta simulació, figura 3.27, s'obté una potència transduïda de 2,881 uW que equival a la potència teòrica que haurien de treure els dos piezos connectats en sèrie del sistema vibracional que s'ha descrit i modelitzat.

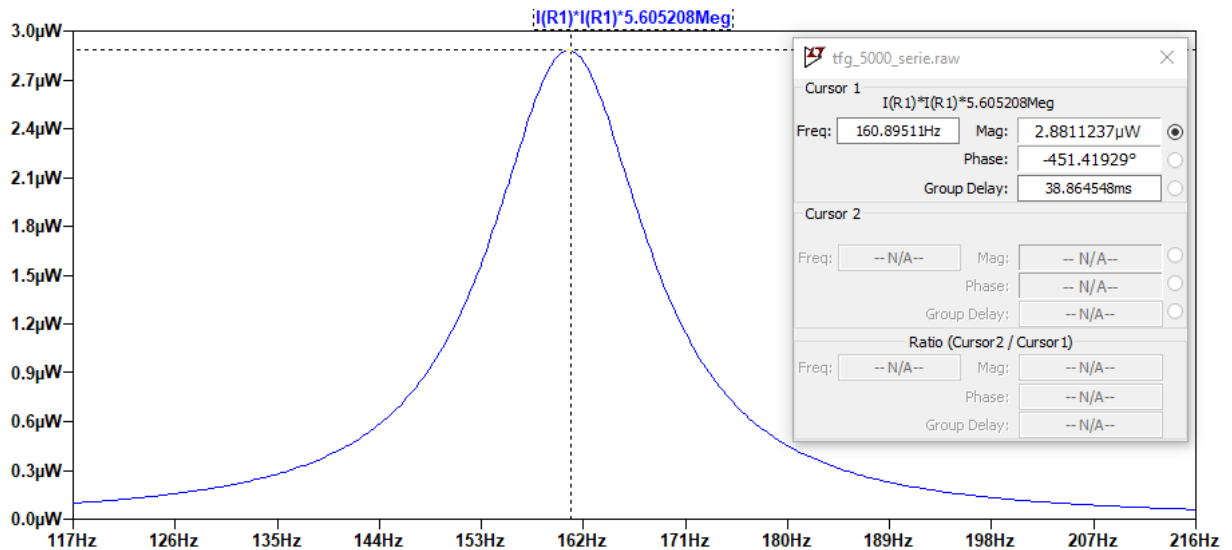


Figura 3.27: Potència transduïda a 160,9 Hz amb 8 piezos en sèrie

Al circuit de la figura 3.28, es troba la implementació del transductor mecanico-elèctric per una freqüència de 225,0 Hz (corresponent a 7000 rpm) amb deu piezos connectats en sèrie.

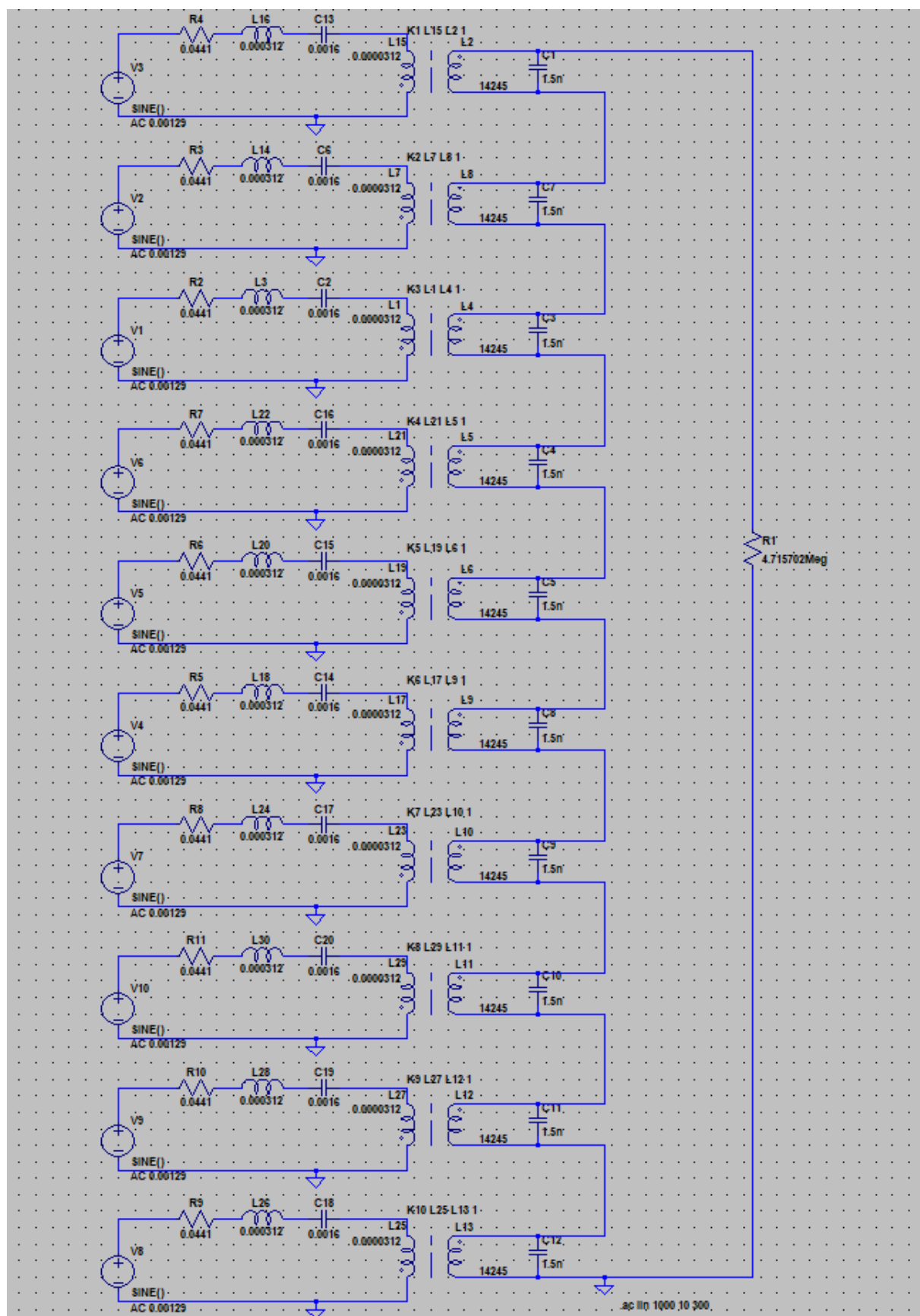


Figura 3.28: Transducció mecánico-elèctrica a 225,0 Hz amb 10 piezos en sèrie



Com a resultat d'aquesta simulació, figura 3.29, s'obté una potència transduïda de 4,221 nW que equival a la potència teòrica que haurien de treure els dos piezos connectats en sèrie del sistema vibracional que s'ha descrit i modelitzat.

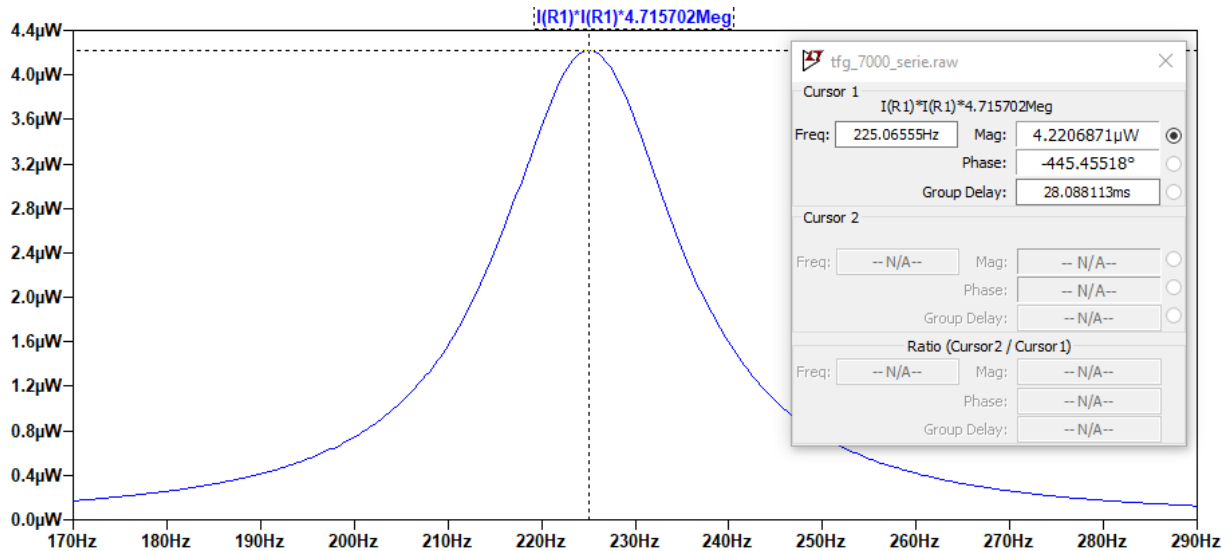


Figura 3.29: Potència transduïda a 225,0 Hz amb 10 piezos en sèrie

A la figura 3.30 es troba simulat tot el sistema conjuntament per així poder veure i analitzar seguidament el comportament i rendiment final del nostre sistema.

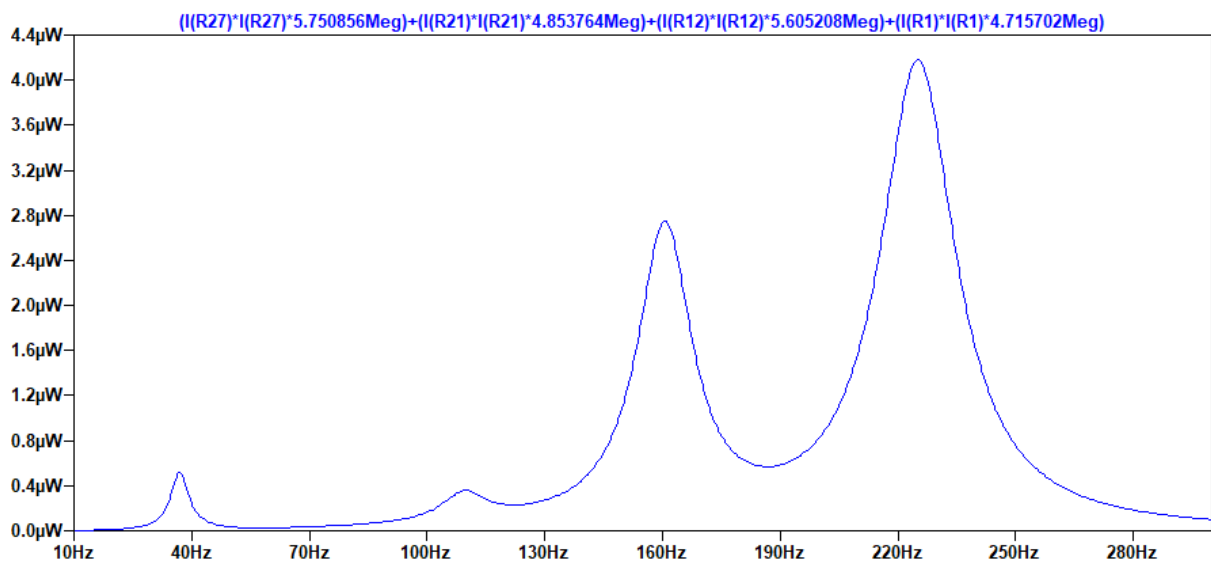


Figura 3.30: Potència elèctrica sistema sencer



## Capítol 4

# Resultats i conclusions

En aquest capítol s'estudien els resultats obtinguts durant la realització del projecte i s'analitza si són satisfactoris, també s'avalua si compleixen els objectius marcats al principi, i s'extrauen conclusions dels resultats i procediments que defineixen aquest projecte.

### 4.1 Resultats

Per analitzar els resultats obtinguts, s'agrupen els resultats de les simulacions a la taula 4.1, d'aquesta manera es pot visualitzar millor el comportament del sistema dissenyat.

Motor(rpm)	Freq.(Hz)	Rl s.(M $\Omega$ )	P. Mec.(uW)	P El.(uW)	P.Mec/P.El.
36,9	36,9	5,750856	6,394	0,525	12,179
109,3	109,3	4,853764	4,228	0,453	9,333
160,9	160,9	5,605208	25,398	2,881	8,816
225,0	225,0	4,715702	36,880	4,221	8,737

Taula 4.1: Resultats d'interès simulacions

A aquesta taula s'observa que la impedància de càrrega en sèrie varia poc, per tant, a l'hora de connectar la sortida dels piezos a l'entrada d'un gestor de potència serà més fàcil adaptar el circuit de manera que hi hagi una resposta pràcticament òptima en tot moment [25], tenint en compte per això els resultats de la figura 3.19. En canvi en paral·lel, com s'ha vist a la taula 3.4, varia bastant la impedància de càrrega, però per un mateix disseny la potència és la mateixa, per això s'ha continuat el disseny amb la connexió sèrie.

La intuïció portaria a pensar que a la segona freqüència (109,3Hz) hi ha un error, perquè la

potència hauria de ser aproximadament un punt intermedi entre les dues freqüències properes (36,9Hz i 160,9Hz), i molt menys, més petit que la primera freqüència. Això es deu principalment a l'acceleració que s'ha mesurat a la taula 2.1, i que condiona la font de tensió del model electromecànic.

El comportament que diferencia els resultats de les quatre freqüències es pot explicar amb la següent fórmula teòrica:

$$P.mec. = \frac{m}{V.angular} * Q * a^2 \quad (4.1)$$

Com es pot apreciar a la fórmula (4.1), l'acceleració de les vibracions és el paràmetre de més pes per determinar la potència mecànica i en conseqüència, la potència elèctrica, ja que és l'únic terme quadrat. Com es pot apreciar a la taula 2.4, aquest terme explica en part el resultat de la figura 3.30.

Per altra banda hi és la massa del cantilever, que a mesura que incrementa, també incrementen les potències. A la taula 2.10 podem trobar com influeix la massa al disseny. I per altra banda, la constant Q que es troba al Datasheet, és l'altra dada que amb el seu increment es veuen incrementades les potències.

I per últim, les potències depenen de la velocitat angular (freqüència) del disseny, però amb l'increment d'aquesta variable, decrementa les potències. La influència d'aquesta dada es troba a la taula 2.4. En el cas d'aquest disseny, com les freqüències no són properes, aquest factor també es nota molt d'una freqüència a altre.

Per tant, es pot concloure que la potència elèctrica és directament proporcional a la potència mecànica, i aquesta és directament proporcional a la massa, a l'acceleració i a la Q; en canvi és inversament proporcional a la freqüència. Destacar que un major número de piezos incrementen la massa i a més hi ha més components que transdueixen potència per a alimentar el node sensor.

Amb els resultats obtinguts, es poden diferenciar dos grups: conducció per ciutat a 50km/h i parades ocasionals, figura 4.1, i per altra banda, conducció per autopista i corbes de muntanya, figura 4.2. Bàsicament es diferencien dos estils de conducció que també diferencien les freqüències de treball en baixes i altes. Aquesta divisió en dues categories prové de la importància de tenir alimentació suficient per al node sensor. El més normal a les aplicacions que es poden implementar amb aquest sistema és que es necessitin conèixer les dades del node sensor a freqüències més elevades, per tant, és molt bo per al sistema que a aquestes freqüències hi hagi una resposta molt bona i a més fer servir més piezos, encara que sigui més car, està justificat.

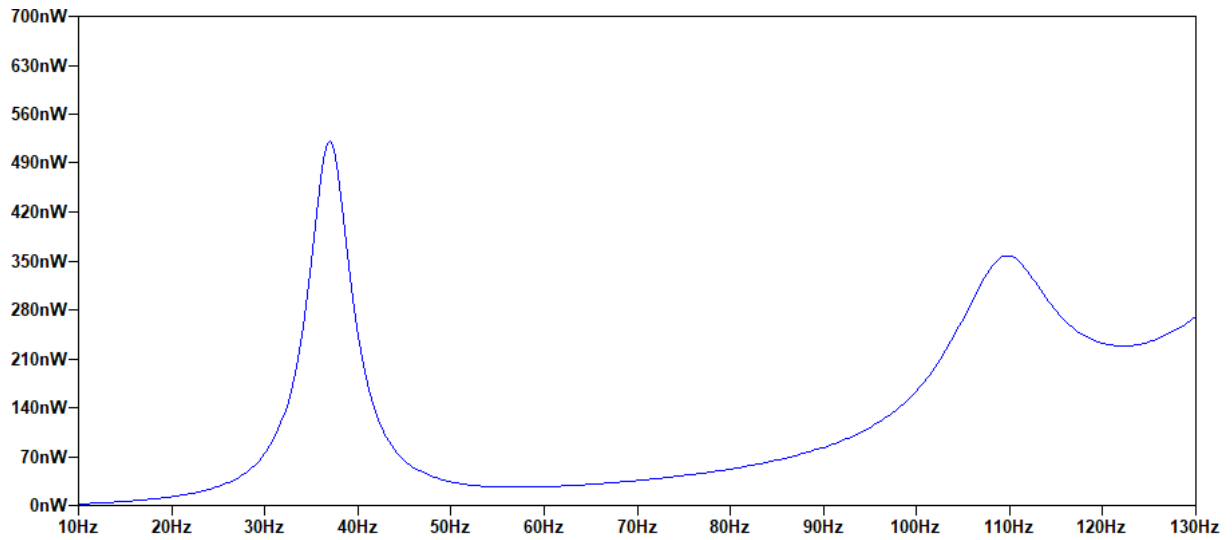


Figura 4.1: Potència elèctrica per ciutat i parades ocasionals

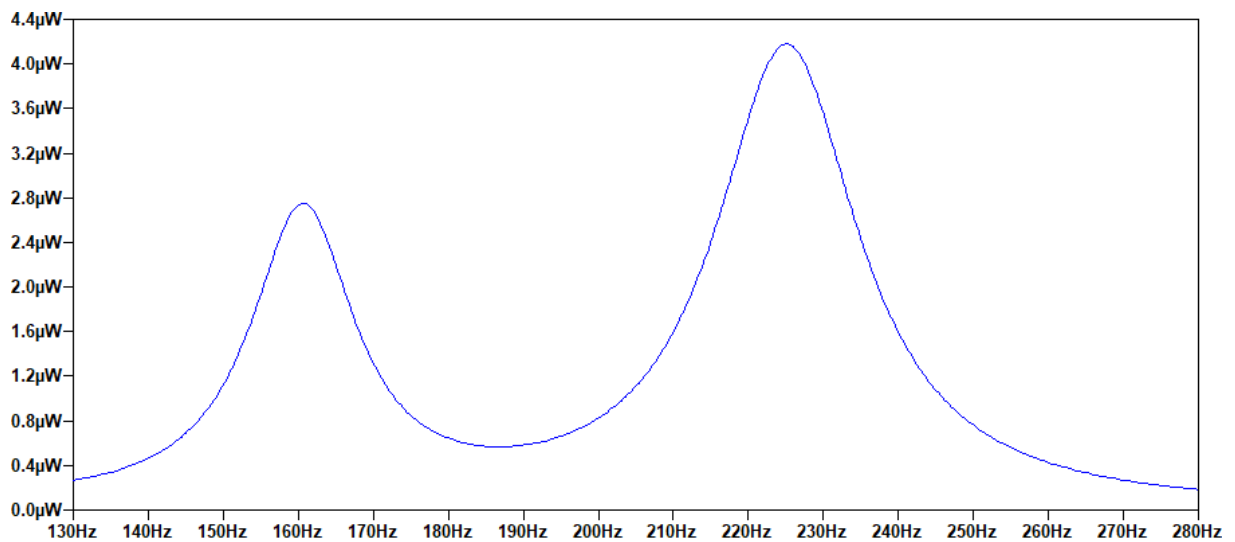


Figura 4.2: Potència elèctrica per autopista i corbes

Com es pot veure a ambdues figures, hi ha un mínim de potència per a totes les freqüències gràcies a la superposició que sumen les potències “residuals” i així es té alimentació a les freqüències de pas també, sobretot a freqüències altes que són de la magnitud de la potència que tenim a freqüències baixes.

## 4.2 Conclusions

L'objectiu que es marcava a l'inici d'aquest treball era aconseguir potència elèctrica d'un sistema vibracional mecànic per alimentar un node sensor sense fils. Ara que ja es coneix la resposta del sistema dissenyat, s'han de conèixer les característiques energètiques d'un node sensor per veure si aquest sistema és capaç d'alimentar-lo. Per això, primer de tot s'ha de saber que un node sensor sense fils, mínimament ha de portar un sensor, un microprocessador o microcontrolador i per últim, un transductor que sigui capaç d'enviar les dades captades pel sensor. Per tant, suposant aquest circuit bàsic sense fils, s'investiguen deu components normals i deu de baix consum, "ultra low power" (ULP), per cada un dels tres components que formen el circuit. Així es poden comparar resultats de consum i si el disseny és capaç d'alimentar algun d'ells. A la taula 4.2 es troba la recopilació de consums en watts (ordenats de petit a gran) de diferents components.

Sensor	Sensor ULP	Micro	Micro ULP	Transceptor	Transceptor ULP
0,06	2,50E-07	1,82E-02	1,36E-08	1,90E-02	5,40E-05
0,09	9,00E-07	1,10E-0	1,80E-07	2,64E-02	7,56E-05
0,10	1,62E-06	1,82E-01	2,00E-07	6,00E-02	2,59E-03
0,10	2,28E-06	2,00E-01	1,65E-06	6,40E-02	4,80E-03
0,10	5,50E-06	2,50E-01	5,70E-06	1,00E-01	7,92E-03
0,11	5,30E-05	3,50E-0	2,00E-04	2,64E-01	9,90E-03
0,20	5,30E-05	3,50E-01	2,60E-04	3,00E-01	3,69E-02
0,20	1,50E-04	4,50E-0	4,20E-04	4,50E-01	3,99E-02
0,25	1,70E-04	6,30E-01	5,00E-04	5,75E-01	4,20E-02
0,30	2,80E-04	1,20E+00	6,93E-04	1,00E+00	5,00E-02

Taula 4.2: Recopilació consum (W) components electrònics (dades recollides d'exercicis de [24])

A la figura 4.3 es mostra gràficament el consum dels 3 tipus de components (deu per cada tipus), graficats tal com indica la llegenda, en color blau hi ha diferents sensors, en color vermell diferents microcontroladors, en color groc diferents transductors i per últim en color verd, la potència que proporciona l'Energy Harvesting dissenyat. Com es pot apreciar, el sistema es troba a 6 ordres de magnitud de poder alimentar un circuit que puguin formar qualsevol dels components de cada categoria.

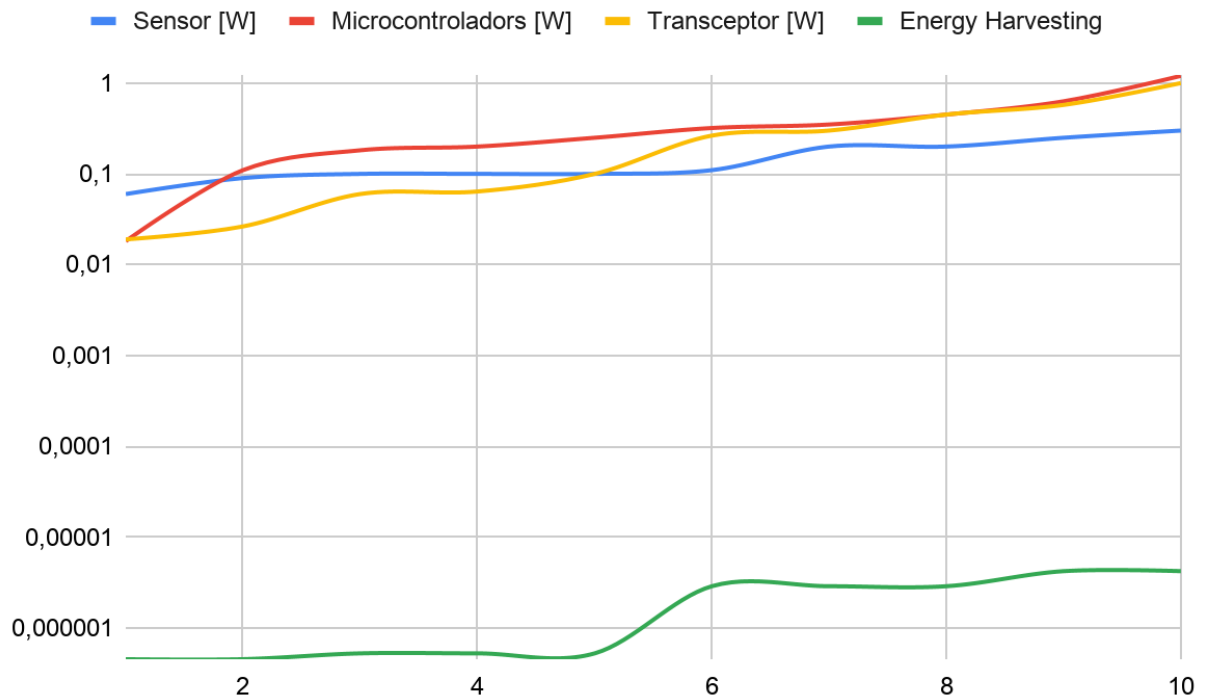


Figura 4.3: Potència per alimentar components electrònics normals

A la figura 4.4 es mostra el mateix que a la figura 4.3, però amb els components ULP, que d'igual manera estan, en color blau diferents sensors, en color vermell diferents microcontroladors, en color groc diferents transductors i per últim en color verd, la potència que proporciona l'Energy Harvesting dissenyat.

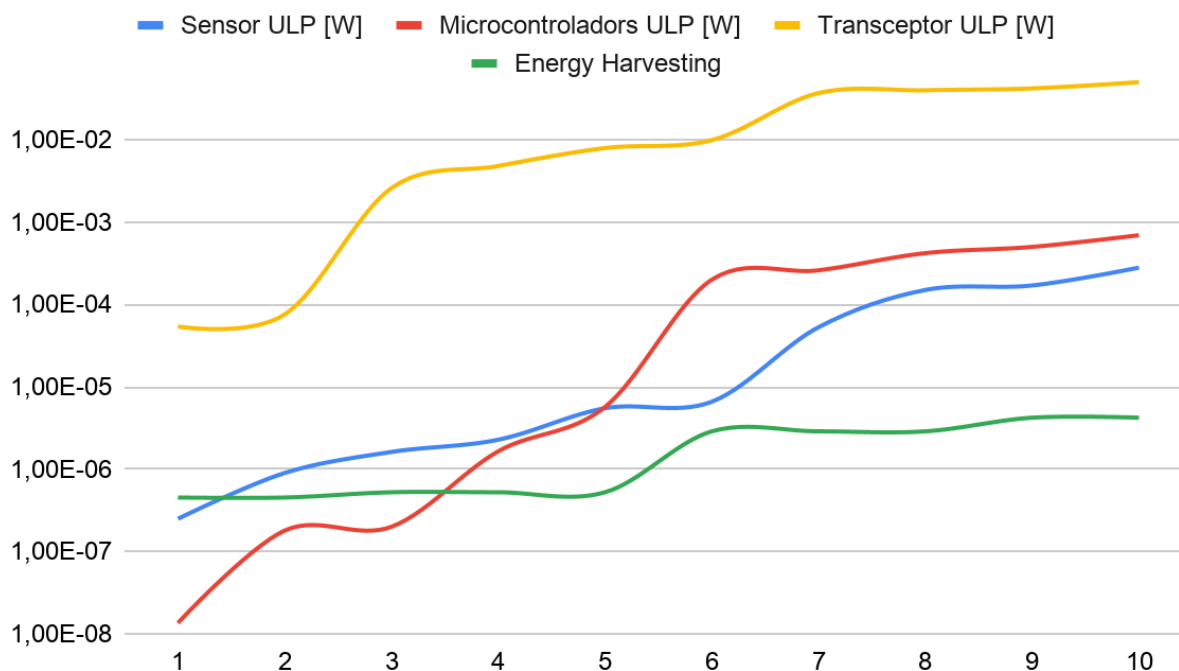


Figura 4.4: Potència per alimentar components electrònics de baix consum

Però a diferència del cas anterior, com es pot apreciar, l'energia que proporciona l'Energy Harvesting és pràcticament de la mateixa magnitud que la que consumeixen el sensor i el microcontrolador si s'escull correctament el component per al circuit. En canvi, el transductor és qui ens dona més problemes, ja que el de més baix consum ( $5,40E-05$  W) es troba un ordre de magnitud per sobre de la potència màxima proporcionada per l'Energy Harvesting.

Però això no suposa un problema per alimentar aquest circuit. Per alimentar-ho el que es fa és connectar la sortida del Harvester a una capacitat que es carrega de manera contínua. Cada cop que vol prendre una dada, el circuit s'alimenta de la càrrega de la capacitat per alimentar el circuit i transduïr la dada, durant un període molt curt de temps, a un circuit que treballa amb aquesta dada. Amb la capacitat descarregada, el sistema Harvestig torna a carregar la capacitat i per tant es repeteix aquest cicle; d'aquesta manera s'aconsegueix alimentar el node sensor sense fils obtenint dades actualitzades periòdicament.

Per tant, es conclou aquest treball demostrant que és possible alimentar un node sensor sense fils amb l'energia obtinguda de les vibracions mecàniques d'una motocicleta.



## Bibliografia

- [1] Eustaquio Martínez-Cisneros, Luis A. Velosa-Moncada, Jesús A. Del Angel-Arroyo, Luz Antonio Aguilera-Cortés, Carlos Arturo Cerón-Álvarez and Agustín L. Herrera-May, 2020, Electromechanical Modeling of MEMS-Based Piezoelectric Energy Harvesting Devices for Applications in Domestic Washing Machines.
- [2] Peihong Wang, Katsuhiko Tanaka, Susumu Sugiyama, Xuhan Dai, Xiaolin Zhao and Jingquan Liu, 2009, A micro electromagnetic low level vibration energy harvester based on MEMS technology.
- [3] K.A. Cook-Chennault, N. Thambi and A.M. Sastry, 2008, Powering MEMS portable devices— a review of non-regenerative and regenerative power supply systems with special emphasis on piezoelectric energy harvesting systems.
- [4] Geon-Tae Hwang, Hyewon Park, Jeong-Ho Lee, SeKwon Oh, Kwi-Il Park, Myunghwan Byun, Hyelim Park, Gun Ahn, Chang Kyu Jeong, Kwangsoo No, Hyuk Sang Kwon, Sang-Goo Lee, Boyoung Joung and Keon Jae Lee, 2014, Self-Powered Cardiac Pacemaker Enabled by Flexible Single Crystalline PMN-PT Piezoelectric Energy Harvester.
- [5] R. Riemer and A. Shapiro, 2011, Biomechanical energy harvesting from human motion.
- [6] J. Paulo and P.D. Gaspar, 2010, Review and Future Trend of Energy Harvesting Methods for Portable Medical Devices.
- [7] Heung Soo Kim, Joo-Hyong Kim and Jaehwan Kim, 2014, A Review of Piezoelectric Energy Harvesting Based on Vibration.
- [8] J. Park, S. Lee, and B.M. Kwak, 2012, Design optimization of piezoelectric energy harvester subject to tip excitation.
- [9] Gonzalo Murillo Rodríguez, 2011, INTEGRATION OF RESONANT N/MEMS FOR ENERGY HARVESTING FROM AMBIENT VIBRATIONS.
- [10] E. Minazara, D. Vasic, and F. Costa, 2008, Piezoelectric generator harvesting bike vibrations energy to supply portable devices.
- [11] S.P. Beeby, M.J. Tudor and N.M. White, 2006, Energy harvesting vibration sources for microsystems applications.
- [12] Joseph A. Paradiso, Thad Starner, 2005, Energy Scavenging for Mobile and Wireless Electronics.
- [13] Shad Roundy, Paul K. Wright and Jan Rabaey, 2002, A study of low level vibrations as a power source for wireless sensor nodes.
- [14] N.S. Shenck and J. A. Paradiso, 2001, Energy scavenging with shoe-mounted piezoelectrics.
- [15] Himanshu Sharma, Ahteshamul Haque and Zainul AbidinJaffery, 2016, Maximization of wireless sensor network lifetime using solar energy harvesting for smart agriculture monitoring.
- [16] Marcelo Miranda Camboin, Orlando Baiocchi, Andréa Willa Rodrigues Villarim, Sebastian Yuri Cavalcanti, Cleonilson Protasio de Souza and Cleumar Da Silva Moreira, 2019, An Automatic Emulation System for Environmental Thermal Energy Harvesting.
- [17] A.A. Gaikwad and S.B. Kulkarni, 2019, Electromagnetic Energy Harvesting to Power the Micro-power Temperature Sensor.
- [18] Christoph Domnik, Simon Hugues and Christoph Degen, 2019, Frugal Energy Harvesting: Microwave Energy Radiated Into the Environment From Wireless Networks.
- [19] S.P. Beeby, R.N. Torah, M.J. Tudor, P. Glynne-Jones, T. O'Donnell, C.R. Saha and S. Roy, 2007, A micro electromagnetic generator for vibration energy harvesting.

- [20] Scott Meninger, Jose Oscar Mur-Miranda, Rajeevan Amirtharajah, Anantha P. Chandrakasan, and Jeffrey H. Lang, 2001, Vibration-to-Electric Energy Conversion.
- [21] T. Sterken, P. Fiorini, K. Baed, R. Puers, G. Borghs, 2003, AN ELECTRET-BASED ELECTROSTATIC  $\mu$ -GENERATOR.
- [22] Mickaël Lallart, Wen-Jong Wu, Linjuan Yan and Sheng-Wei Hung, 2020, Inductorless Synchronized Switch Harvesting Using a Piezoelectric Oscillator.
- [23] A. Erturk and D. J. Inman, 2011, Piezoelectric Energy Harvesting.
- [24] Gabriel Abadal Berini, Nuria Barniol, 2019, Aplicacions Multidisciplinàries I, Escola d'Enginyeria, UAB.
- [25] Shad Roundy, Eli S. Leland, Jessy Baker, Eric Carleton, Elizabeth Reilly, Elaine Lai, Brian Otis, Jan M. Rabaey, Paul K. Wright and V. Sundararajan, 2005, Improving Power Output for Vibration-Based Energy Scavengers.